

Technische Universität Berlin  
Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik  
Fachgebiet Computational Psychology

## **Bachelorarbeit**

# **Vergleich zwischen E-Papier und Bildschirm als Anzeigeform von optischen Reizen**

Ji Hyea Park

B.Sc. Medientechnik

Matrikel-Nr. 403318

Berlin, 12. Januar 2024

Erstgutachter: Dr. Guillermo Aguilar

Zweitgutachter: Prof. Dr. Marc Alexa



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 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ji Hyea Park



## Zusammenfassung

Seit Ende des 20. Jahrhunderts wurden die Forschungen zur Helligkeitswahrnehmung mehr mit Bildschirmen durchgeführt. Es machte einen Unterschied zu der Zeit, als die Studien mit Papier und Leuchtmitteln durchgeführt wurden. Computer-generierten Bildern haben die Kontrolle über die Reize einfacher gemacht, dennoch ist es wichtig zu wissen, dass die Bildschirme eine spezielle Oberfläche besitzen, die das Licht ausstrahlt. Die selbstleuchtende Oberfläche weist sowohl Lightness als auch Brightness, wobei das traditionelle Papier, das das Licht von den Leuchtmitteln reflektiert, nur Lightness besitzt. Obwohl Lightness und Brightness oft ohne Unterschied betrachtet werden, handelt es sich um zwei unterschiedliche Begriffe mit verschiedenen Bedeutungen. Lightness bezieht sich auf den wahrgenommenen Reflexionsgrad. Brightness bezieht sich auf die wahrgenommene Leuchtdichte. Das Ziel der Arbeit ist zu überprüfen, ob es einen Unterschied in Helligkeitswahrnehmung zwischen den Reize auf dem Bildschirm und auf dem Papier gibt. Ein normales Papier ist jedoch nicht effektiv für die Vorbereitung der Reize. Es gibt eine neue Anzeigeform, die E-Papier heißt. Es ist mit computer-generierten Bildern bedient aber dessen Oberfläche nur reflektiert das Licht. Daher eignet es sich gut als ein Ersatz für ein normales Papier.

Um die Magnitude der Phänomene in Helligkeitswahrnehmung auf dem E-Paper und auf dem Bildschirm zu vergleichen, haben wir die Reize auf beiden Anzeigeformen unter fotometrisch und geometrisch identischen Bedingungen aufgestellt. 2-Alternative-Forced-Choice wurde benutzt, um die Magnitude der Phänomene zu bestimmen. Davon wurden psychometrische Funktionen erstellt. Wir ermittelten den jeweiligen Point-of-Subjective-Equality und sein 95 %-Konfidenzintervall. Dies diente zum Vergleich der Anzeigeformen. Es wurde kein signifikanter Unterschied in der Magnitude der Effekte auf beiden Anzeigeformen gefunden. Vergangene Studien gaben Hinweise auf mögliche Probleme, die das Experiment und seine Ergebnisse beeinflusst haben könnten. Dennoch sind weitere Forschungen erforderlich, um die Unterschiede zwischen Lightness und Brightness sowie die Auswirkungen verschiedener Anzeigemethoden auf die Wahrnehmung von Lightness und Brightness zu untersuchen.



## **Abstract**

Since the end of the 20th century, there has been a growing number of studies on lightness and brightness using computer monitors. This is different from the time when studies used stimuli set up with paper and illuminants. Computer-generated images have made it easier to control stimuli, but it is important to note that computer monitors have a special surface that emits light. The surface that emits light has both lightness and brightness, whereas traditional paper, which reflects the light from illuminants, only have lightness. Although lightness and brightness are often treated as similar, they are two different terms with distinct meanings. Lightness refers to perceived reflectance, while brightness refers to perceived luminance. The aim of the thesis is thus to find out if there is a difference in lightness or brightness perception, when stimuli are viewed on monitor compared to paper and illuminants. However, a traditional paper is not an effective means of preparing stimuli. There has been a new form of display, called e-paper. It uses computer-generated images but its surface only reflects light, making it a suitable substitute for traditional paper.

To compare the effects of simultaneous brightness contrast and White's effect on both e-paper and monitor displays, we set up stimuli under photometrically and geometrically identical conditions. We used a two-alternative forced choice method to determine the magnitude of both effects and created psychometric functions for each. We obtained the respective point of subjective equality and its 95% confidence interval for each function and used them to compare the display devices. The study found no significant differences in the magnitude of the effects on both displays. Previous studies provided indications of potential issues that could have affected the experiment and its results. Nonetheless, further research is needed to explore the differences between lightness and brightness, as well as the impact of different display methods on lightness and brightness perception.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1	Helligkeit . . . . .	2
1.2	Anzeigeformen: Bildschirm und E-Papier . . . . .	4
1.3	Relevante Forschungen . . . . .	6
1.4	Forschungsfrage und Hypothese . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Methoden</b>	<b>9</b>
2.1	E-Papier als Anzeigeform . . . . .	9
2.2	Bildschirm als Anzeigeform . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>17</b>
3.1	Psychometrische Funktion . . . . .	17
3.2	Konfidenzintervalle . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>19</b>
4.1	Abweichung in Leuchtdichten . . . . .	19
4.2	Beleuchtung . . . . .	21
4.3	Fazit . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Tabelle</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>Grafiken</b>	<b>28</b>
	<b>Literatur</b>	<b>35</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Helligkeit

Mach (1865) behauptet, „Weiß von geringerer Lichtintensität erscheint neben hellerem Weiss grau. Andererseits sind wir bei den verschiedensten Beleuchtungsgraden, in hellem Sonnenscheine, bei bewölktem Himmel, in der Dämmerung, bei Kerzenlicht niemals im Zweifel, ob wir ein weisses oder graues Papier vor uns haben. Wir haben immer nahezu dieselbe Empfindung.“. Es ist genauso wie von Murray (2021) argumentiert, erscheinen zwei graue Stellen mit gleichem Reflexionsgrad normalerweise etwa gleich grau, auch wenn eine im Licht und die andere im Schatten liegt. Es gibt jedoch ein separates Hell-Dunkel-Kontinuum, auf dem die graue Stelle im Schatten dunkler erscheint als die graue Stelle im Licht. Gilchrist (2006) beschreibt dies so, dass schwarzes Papier im hellen Licht genauso viel Licht ins Auge reflektiert wie schwarzes Papier im Schatten. Trotzdem wirkt das schwarze Papier schwarz und das weiße Papier weiß. Diese Zitate von drei verschiedenen Autoren zu verschiedenen Zeiten zeigen eine gemeinsame Sache: Sie beschreiben die zwei Betrachtungsweisen der Helligkeit im Forschungsgebiet der Helligkeitswahrnehmung.

Der erste Ansatz beschreibt die Helligkeit als den wahrgenommenen Reflexionsgrad einer Oberfläche (Arend, 1993), *Lightness* in englischer Sprache. Der Reflexionsgrad einer Oberfläche wird durch ihre molekulare Struktur bestimmt (Gilchrist, 2006). Die Helligkeit als *Lightness* beinhaltet somit eine intrinsische und objektive Eigenschaft einer Oberfläche (Murray, 2021). Außerdem bezieht sich *Lightness* auf achromatische Oberflächefarbe. Zum Beispiel, beschreibt der Begriff „Schwarz“, die *Lightness* einer Oberfläche (Gilchrist, 2006). Es handelt sich somit um eine Eigenschaft der Oberfläche und nicht des Lichts. Das schwarze Papier bleibt demnach unter jeder Beleuchtung schwarz und das weiße Papier weiß.

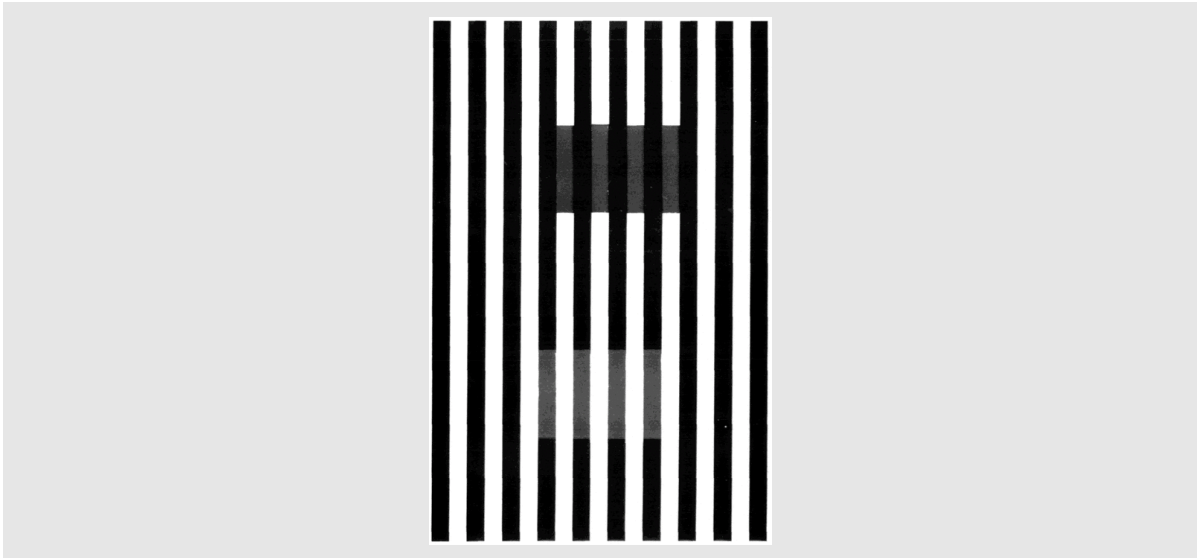
Der zweite Ansatz beschreibt die Helligkeit als die wahrgenommene Leuchtdichte einer Oberfläche, *Brightness* in englischer Sprache. Die Helligkeit als *Brightness* beschreibt die aus einem bestimmten Sehwinkel wahrgenommene Lichtmenge (Arend, 1993; Gilchrist, 2006). Es zeigt die Menge an Licht, die von einer Oberfläche ausgeht und in die Augen gelangt. *Brightness* ist die Wahrnehmung der reinen Lichtstärke an der gegebenen Position im Sichtfeld (Gilchrist, 2006). Daher erscheint ein Papier, abgesehen von dessen Reflexi-

onsgrad, im hellen Licht heller und im Schatten dunkler. Murray (2021) weist darauf hin, dass der Eindruck entstehen könnte, dass Lightness und Brightness einfach unabhängig voneinander wären, wenn die beiden Definitionen so dargestellt würden. Er diskutiert, dass die Beziehung zwischen den beiden jedoch differenziert ist und vieles über diese Beziehung noch nicht verstanden ist. Dies liegt zum Teil daran, dass sich die Literatur zu Lightness und Brightness oft getrennt voneinander entwickelt hat, mit wenig Interaktion (Murray, 2021).

Die Lightness-Konstanz ist eines der grundlegenden Phänomene der Helligkeitswahrnehmung. Sie besagt, dass der wahrgenommene Reflexionsgrad eines Objekts unabhängig von den Beleuchtungsbedingungen konstant bleibt. Das Zitat von Mach (1865) illustriert dieses Phänomen deutlich.

$$L(x, y) = I(x, y) \cdot R(x, y) \quad (1.1)$$

Die Gleichung 1.1 beschreibt die Lightness-Konstanz. In einer zweidimensionalen Bildfläche sind  $x$  und  $y$  die kartesischen Koordinaten,  $L$  steht für die wahrgenommene Leuchtdichte,  $I$  für die Beleuchtungsstärke und  $R$  für den wahrgenommenen Reflexionsgrad (Kingdom, 2011). Der wahrgenommene Reflexionsgrad, Lightness, der Fläche bleibt ungefähr konstant, unabhängig von der Beleuchtung. Dabei ändert sich die Leuchtdichte der Oberfläche (Gilchrist, 2006). Später wurde eine weitere Art von Lightness-Konstanz erkannt. Es umfasste das Phänomen, dass wahrgenommene Lightness der Oberfläche konstant bleibt, unabhängig davon, welche Oberflächen sich in der Nähe befinden. Die benachbarte Oberfläche wirkt also wie die Beleuchtung. (Gilchrist, 2006). In Abbildung 2.1a sind zwei graue Vierecke zu sehen, die trotz unterschiedlicher Reflexionsgrade der Umgebung immer noch grau aussehen. Bemerkenswert ist, dass diese beiden Vierecke in der Tat die gleiche Leuchtdichte aufweisen. Das Viereck auf schwarzem Hintergrund sieht heller aus als das auf weißem Hintergrund. Diese Art von optischer Täuschung wurde *der simultane Helligkeitskontrast* benannt. Es gibt einen ähnlichen optischen Reiz, der von White (1979) gefunden wurde und *White's Effekt* oder *White's Illusion* bekannt ist. Die zwei Sätze von identischen grauen Vierecken weisen unterschiedliche Wahrnehmungen auf, abhängig davon, ob sie von schwarzen oder weißen Flächen umgeben sind. Im Gegensatz zum SBC erscheinen hier die grauen Quadrate heller, wenn sie von weißen Flächen umgeben sind. Die Abbildung 1.1 zeigt den originalen Reiz von White (1979).



**Abb. 1.1:** *White's Effect*. Die beiden Sätze mit den grauen Vierecken oben und unten sind geometrisch und fotometrisch identisch. Die Vierecke, die an die weißen Oberflächen angrenzen, wirken heller. Der Reiz stammt aus der Arbeit von White (1979).

## 1.2 Anzeigeformen: Bildschirm und E-Papier

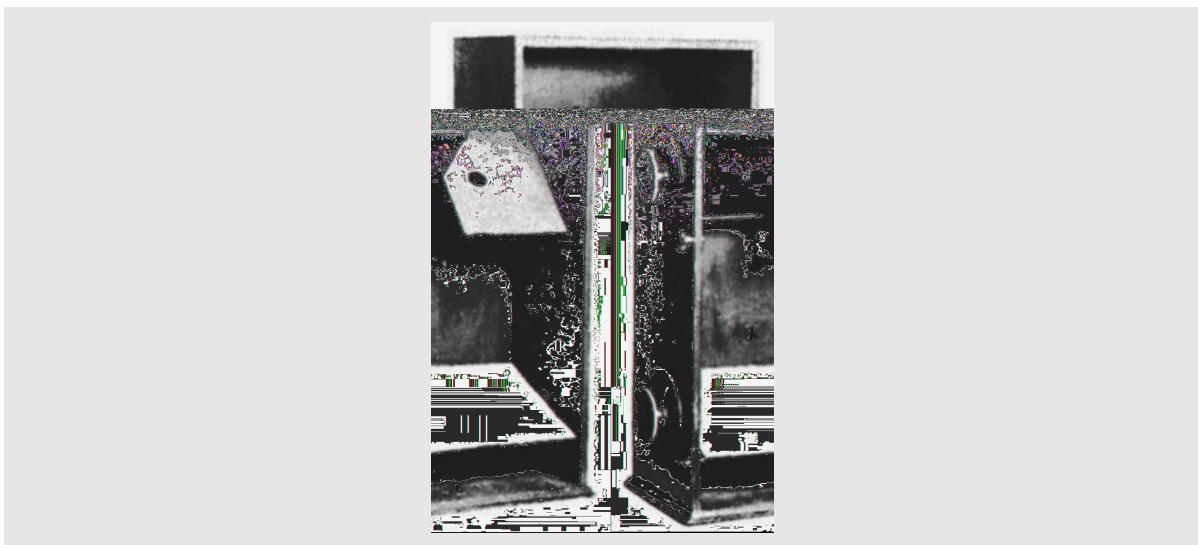
Am Ende des 20. Jahrhunderts wurden die Forschungen zur Helligkeit langsam mehr mit CRT-Monitoren durchgeführt. Die Anzahl der ForscherInnen war gestiegen, die ihre Forschungen durch Beurteilungen berichteten, welche auf CRT-Monitor simulierten Oberfläche basierten (Agostini & Bruno, 1996).

Als Bildschirme wie CRT-Monitore im Forschungsfeld noch nicht benutzt wurden, wurden die Reize mithilfe des Munsell-Papiers und der Beleuchtung in einem ansonsten dunklen Raum umgesetzt. Diese Anzeigart wurde von Agostini und Bruno (1996) als Papier-und-Leuchtmittel bezeichnet. Bei den Studien, die mit Papier-und-Leuchtmittel durchgeführt wurden, war deutlich, dass das Phänomen von Lightness untersucht wurde. Die Experimente mit Papier-und-Leuchtmittel hatten jedoch im Vergleich zum Bildschirm einige Nachteile.

Erstens gibt es eine Grenze, wenn die Reize manuell mit Papier erzeugt werden müssen. Die Anzahl der Reize in den Forschungen zur Helligkeitswahrnehmung beträgt normalerweise Hunderte und die manuelle Erstellung ist nicht so effektiv. Zweitens ist für die Forschung zur Helligkeitswahrnehmung eine fotometrische Kalibrierung bei den Experimenten wichtig. Es ist einfacher, die benötigten fotometrischen Bedingungen mit einem Bildschirm zu erreichen, da die Reize für den Bildschirm mit dem Rechner generiert werden.

Die computer-generierten Bilder haben den großen Vorteil, dass sie eine einfache Kontrolle über die Reize ermöglichen (Murray, 2021).

Es wäre möglich, einen Apparat zu entwickeln, wie Gelb (1932) für sein Experiment aufgebaut hat. Der Gelb-Apparat (siehe Abbildung 1.2) besteht aus zwei rechteckigen Platten mit gleicher Leuchtdichte, die von oben betrachtet werden. Die weiße Platte wird von der Beleuchtung weg geneigt, während die schwarze Platte sich zur Beleuchtung hin neigt. Durch Änderung der Neigung der beiden Platten kann die Leuchtdichte verändert werden. Es handelt sich dennoch um eine aufwendigere Arbeit, als wenn die Reize am Computer generiert und kontrolliert werden.



**Abb. 1.2:** *Der Gelb-Apparat* wurde für das Experiment von Gelb (1932) hergestellt. Die Versuchsperson betrachtete den Apparat von oben. Die Leuchtdichte konnte durch die Änderung des Neigungswinkels der Platten variiert werden. Das Bild stammt aus dem Buch von Gilchrist (2006).

Obwohl der Bildschirm diesen Vorteil bietet, hat er eine spezielle Eigenschaft, die berücksichtigt werden sollte. Der Bildschirm, egal welcher Art, besitzt eine selbstleuchtende Oberfläche. Wie im Abschnitt 1.1 erläutert wurde, ist Lightness der wahrgenommene Reflexionsgrad einer Oberfläche und Brightness ist die Lichtmenge von einer Oberfläche, welche im Auge ankommt. Wenn ein Reiz, zum Beispiel vom simultanen Helligkeitskontrast auf dem Bildschirm gezeigt wird, stellt sich die Frage, ob es sich bei den Experimenten um Lightness oder Brightness handelt. Selbstleuchtende Bereiche besitzen Brightness, aber keine Lightness. Undurchsichtige Oberflächen besitzen dagegen sowohl Lightness als auch Brightness (Gilchrist, 2006). Es ist somit klar, dass die Reize auf dem Bildschirm sowohl Lightness als auch Brightness umfassen. Wie von Murray (2021) erläutert, gibt

es noch viel zu verstehen über die Beziehung zwischen Lightness und Brightness. Die Frage ist, ob die Forschungen zur Helligkeitswahrnehmung vollständig sind, wenn sie nur auf Bildschirmen durchgeführt werden, ohne diese Beziehung zu wissen. Es könnte argumentiert werden, dass die Studien der Helligkeitswahrnehmung heutzutage ausschließlich auf Brightness fokussiert sind und dass es anders sein könnte, wenn die Forschungen mit Papier-und-Leuchtmittel durchgeführt würden und sich auf Lightness konzentrieren würden.

Bevor auf diese Frage eingegangen wird, soll ein Blick auf das elektronische Papier (E-Papier) geworfen werden. E-Papier ist eine neue Art von Anzeigegerät, dessen Oberfläche aus E-Ink-Zellen besteht. Im Gegensatz zu herkömmlichen Bildschirmen strahlt die Oberfläche des E-Papiers kein Licht aus, sondern reflektiert es nur. Dadurch ähnelt das E-Papier normalem Papier. Wenn der Reiz des simultanen Helligkeitskontrasts auf dem E-Papier gezeigt wird, entspricht die Helligkeit der Lightness. Außerdem hat E-Papier den ersten Vorteil vom Bildschirm, dass es auch mit computer-generierten Bildern funktioniert. Dadurch ist die Vorbereitung der Reize weniger umständlich als mit Papier-und-Leuchtmittel. Obwohl das E-Papier diesen Vorteil hat, sollten die Reize auf dem E-Papier im Prinzip durch externe Lichtquellen beleuchtet werden. Deshalb könnte die fotometrische Kalibrierung noch etwas schwierig bleiben.

### 1.3 Relevante Forschungen

Gilchrist (2006) wies auf die Forschungen hin, in den Lightness und Brightness entweder mit dem Bildschirm oder mit dem Papier-und-Leuchtmittel gemessen wurden. Arend und seine Kollegen (Arend und Goldstein, 1987, 1990; Arend und Spehar, 1993a,1993b) haben Lightness und Brightness in den Szenen mit verschiedenen Beleuchtungen auf dem CRT Monitor gemessen. Jacobsen und Gilchrist (1988) haben ebenfalls Lightness und Brightness mithilfe der Nachbildung von Jameson und Hurvich (1961) gemessen, jedoch mit Papier-und-Leuchtmittel. Gemäß Gilchrist wurde ein ähnliches Verhaltensmuster sowohl bei Arend und seinen Kollegen, als auch bei Jacobsen und Gilchrist beobachtet. Dabei verfolgte Lightness den Reflexionsgrad, unabhängig davon, ob es simuliert oder physisch dargestellt wurde. Brightness verfolgte grob die Leuchtdichte.

Darüber hinaus demonstrierten Arend und Spehar (1993a,1993b, wie zitiert in Blakeslee et al., 2008) drei mögliche Beurteilungsarten von Lightness. Zum einen, dass Lightness-Beurteilungen identisch zur Brightness-Beurteilungen wären. Zweitens, dass es identisch zu den lokalen Brightness-Kontrast Beurteilungen wären, d.h. es bezieht sich auf die offen-

sichtliche lokale Leuchtdichte-Differenz zwischen dem Target und dessen Hintergrund. Schließlich, dass es die unabhängige dritte Dimension des achromatischen Erlebnis repräsentiert. Die letzte Art von Beurteilung gilt nur wenn die Beleuchtung in gesamten Bereichen der Anzeige sichtbar ungleichmäßig ist (Blakeslee et al., 2008). In diesem Fall hängt die Beurteilung der Lightness von der Beleuchtung ab. Blakeslee und McCourt (2003) nennt diese Art von Lightness als geschätzte Lightness (*inferred-lightness*), wie zitiert in Blakeslee et al. (2008). Blakeslee und McCourt argumentieren, dass die geschätzte Lightness eine kognitive Interpretation beinhaltet und dass die Beurteilung der geschätzten Lightness auf Brightness oder Brightness-Kontrast basiert ist. Brightness-Kontrast bedeutet die wahrgenommene Differenz von Brightness.

Agostini und Bruno (1996) untersuchten, ob die Art der Anzeige einen Einfluss auf die Magnitude des simultanen Helligkeitskontrasts hat. In zwei von drei Experimenten wurde dies mit zwei Anzeigeformen untersucht: CRT-Monitor und Papier-und-Leuchtmittel. Die Zuordnung erfolgte für beide Anzeigeformen anhand der Munsell-Farbskala. Es gab jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Anzeigeformen. Agostini und Bruno haben außerdem auf die Arbeiten von Savoy und O'Shea (1993) und O'Shea und Savoy (1995) hingewiesen, in denen ebenfalls der Vergleich zwischen beiden Anzeigeformen durchgeführt wurde und kein Unterschied festgestellt wurde. Sie wiesen auf eine weitere Studie hin. Bruno (1994) hat die Experimente mit dem Papier-und-Leuchtmittel von Gilchrist (1988) auf dem CRT-Monitor simuliert. Dabei wurde festgestellt, dass die Magnitude des Helligkeitskontrasts 2,5-mal größer als in der Originalstudie von Gilchrist war.

Die AutorInnen der Forschungen, in denen die Reize *real* mit Papier-und-Leuchtmittel dargestellt wurden, sollten bei der Wahl und Installation des Leuchtmittels sorgfältig vorgegangen sein. Es gab viele verschiedene Einstellungen der Lichtquellen. Jacobsen und Gilchrist (1988) stellten Glühbirnen unterschiedlicher Stärken zusammen, um die gewünschte Beleuchtungsstärke zu erreichen. Blakeslee et al. (2008) haben für das Experiment mit dem matten Munsell-Papier und dem projizierten Licht mittels Beamer die reale Darstellung vorbereitet. In der Studie von Radonjic et al. (2016) erfolgte die Beleuchtung durch regelbare LED-Lichtmodule, die an der Decke installiert wurden. Der Versuchsaufbau befand sich in einer schwarzen Box, und der Proband sah den Reiz durch eine Luke. Patel et al. (2018) verwendete zwei Arten von Lichtquellen: eine Leuchtstofflampe über dem Kopf und einen Beamer, der vor dem Reiz installiert wurde.

## 1.4 Forschungsfrage und Hypothese

Die meisten Studien zur Helligkeitswahrnehmung wurden heutzutage mittels Bildschirmen durchgeführt. Es ist zu beachten, dass Bildschirme eine selbstleuchtende Oberfläche besitzen, die sowohl Lightness als auch Brightness beeinflussen kann. Es stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse gleich bleiben würden, wenn die gleichen Reize in realer Form untersucht werden. Da Lightness und Brightness tatsächlich zwei unterschiedliche Eigenschaften sind, könnte dies eine viel größere Auswirkung haben als erwartet. Die Forschungsfrage lautet daher: Würde die Anzeigeform die Experimente zur Helligkeitswahrnehmung beeinflussen?

In dieser Arbeit wird untersucht, ob die Anzeigeform einen Unterschied in der Magnitude von den Phänomenen der Helligkeitswahrnehmung verursacht. Meine Hypothese lautet, dass die Anzeigeform einen Unterschied ausmacht. Lightness bezieht sich auf den natürlichen Sehprozess, während Brightness bei einer matten Oberfläche einen speziellen und unnatürlichen Sehmodus beinhaltet (Gilchrist, 2006). Meine Vermutung ist, dass die Phänomene bei dem Experiment mit E-Papier als Anzeigeform stärker wären. Die Helligkeit hat sich erstens mit Lightness entwickelt. Lightness stellt eine absolute und unveränderliche Natur einer Oberfläche dar. Daher würde der Effekt auch stärker wahrgenommen werden, wenn er in einer *natürlichen* Umgebung untersucht würde.

## 2 Methoden

Es gab dauernd Verwirrungen mit den Begriffen Lightness und Brightness (Gilchrist, 2006). In dieser Arbeit ist Helligkeit als Lightness oder als Brightness geschrieben, um die Bedeutung deutlich zu zeigen und somit die Verwirrung zu vermeiden. Wenn die Bedeutung vom Begriff Helligkeit nicht eindeutig angeordnet werden muss, wird *Helligkeit* verwendet, z.B. im Begriff „der simultane Helligkeitskontrast“. Wenn es aber abgekürzt wird, wird es als SBC bezeichnet, als eine Abkürzung von dem englischen Begriff „Simultaneous Brightness Contrast“. Die Abkürzung wurde einfach von dem Tool für Reizerzeugung genommen und impliziert nicht, dass es um Brightness geht.

Im kommenden Methoden-Abschnitt wird zuerst beschrieben, wie die Einstellungen für die Experimente mit dem E-Papier als Anzeigeform vorgenommen werden. Dies erfolgt in vier Schritten: Zunächst wird über die Reize gesprochen, dann über die Apparate, danach über das Kalibrieren und schließlich wird der Durchlauf des Experiments ausführlich erklärt. Als Nächstes wird beschrieben, wie dies auf dem Bildschirm simuliert bzw. nachgeahmt wird. Auch hier erfolgt die Beschreibung in den gleichen vier Schritten.

Der Reflexionsgrad wird als Dezimalzahl dargestellt. Zum Beispiel wird ein Reflexionsgrad von 50 % als 0,5 bezeichnet. Alle zweidimensionalen Maße werden als Breite × Höhe eingegeben. Bei Bedarf kann auch nur die Höhe angegeben werden. Werte mit mehr als vier Dezimalstellen werden auf die dritte Dezimalstelle gerundet. Dezimalzahlen werden im Fließtext mit Komma geschrieben, jedoch in Tabellen und Abbildungen mit Punkt. Skripte und Datensätze für die Experimente sind im Git-Repository<sup>1</sup> verfügbar.

### 2.1 E-Papier als Anzeigeform

#### Reize

*Der simultane Helligkeitskontrast (SBC)* und die vereinfachte Version von *White's Effect (White)* wurden als Reizarten gewählt. Eine Grundeinstellung sollte etabliert werden, um die

---

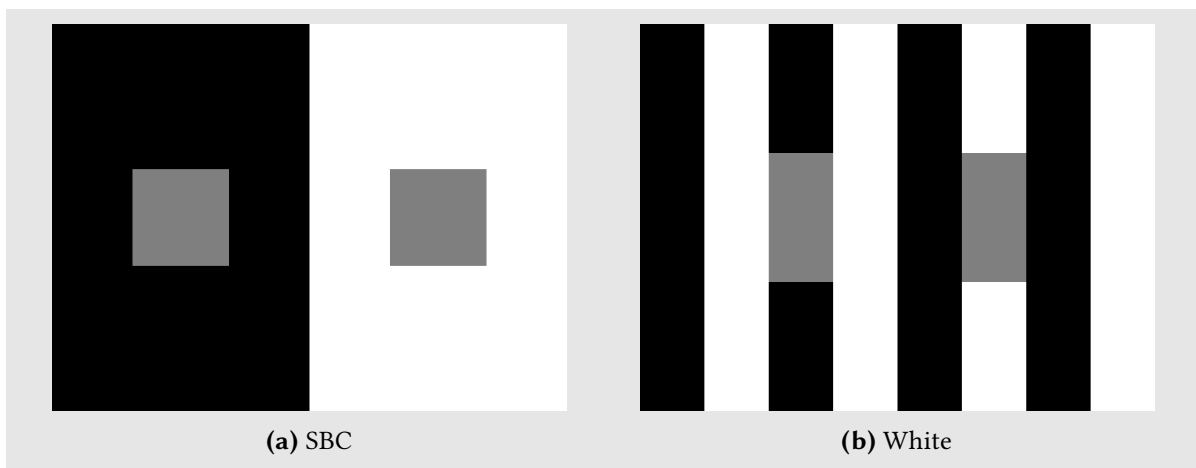
<sup>1</sup> <https://github.com/jihyea-park/bachelorthesis>



Reize besser zu kontrollieren. Die Grundeinstellung von den zwei Reizarten im Experiment wies folgende Eigenschaften auf.

1. Der Reflexionsgrad oder die Farbe des Hintergrunds war entweder 0 (Schwarz) oder 1 (Weiß). Auf der linken Seite war der Hintergrund immer Schwarz und auf der rechten Seite immer Weiß. Dadurch wurde bei beiden Reizarten erreicht, dass das graue Viereck auf der linken Seite einen schwarzen Hintergrund und das graue Viereck auf der rechten Seite einen weißen Hintergrund besitzt.
2. Die beiden grauen Vierecke im Reiz hatten einen Reflexionsgrad von 0,5 und dieselbe Leuchtdichte.

Aus zwei obengenannten Eigenschaften resultierte, dass das graue Viereck auf der *linken* Seite *heller* erschien. Die Abbildung 2.1 zeigt die Basisreize der beiden Reizarten mit der Grundeinstellung.



**Abb. 2.1:** Basisreize nach der Grundeinstellung. Der Reflexionsgrad der beiden grauen Vierecken lag bei 0,5. Der Reflexionsgrad vom Hintergrund war 0 (Schwarz) auf der linken Seite und 1 (Weiß) auf der rechten Seite.

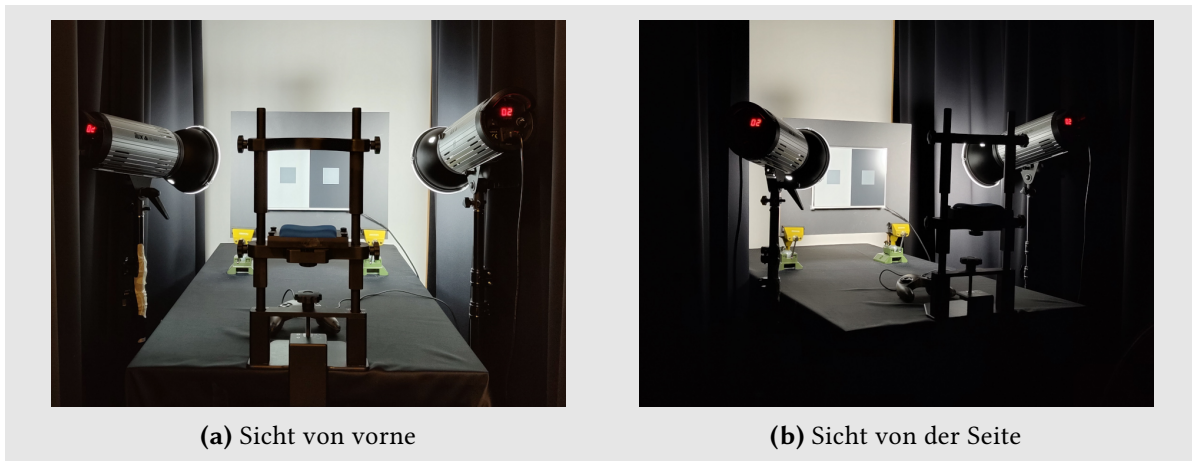
Die zwei grauen Vierecke in den Reizen wurden durch ein Target-Viereck (Target,  $T$ ) und ein Probe-Viereck (Probe,  $P$ ) getrennt. Der Reflexionsgrad des Targets wurde auf 0,5 festgelegt. Der Reflexionsgrad der Probe wurde abhängig von der Hintergrundfarbe ausgewählt. Die Positionierung wurde in zwei Fällen festgelegt. Wenn sich das Target auf weißem Hintergrund befand, befand sich die Probe auf schwarzem Hintergrund. Im zweiten Fall war es umgekehrt: Das Target befand sich auf schwarzem Hintergrund und die Probe auf weißem Hintergrund. Beim ersten Fall wurde der Reflexionsgrad in einem

geschlossenen Intervall von 0,6 bis 0,9 mit einer Schrittweite von 0,06 gewählt. Die Werte waren 0,6, 0,66, 0,72, 0,78, 0,84 und 0,9. Beim zweiten Fall wurde der Reflexionsgrad aus einem geschlossenen Intervall von 0,1 bis 0,4 mit einer Schrittweite von 0,06 gewählt. Die Werte waren 0,1, 0,16, 0,22, 0,28, 0,34 und 0,4. Aus der Bedingung ergaben sich insgesamt 24 Probereize, 12 unterschiedliche Probereize pro Reizart.

Die Reize wurden mithilfe des Python-Pakets „Stimupy“ (2023, 15. Februar/n. d.) generiert. Dafür mussten Größe und Reflexionsgrade bestimmt werden. Um die Größe der Reize zu bestimmen, wurde der Sehwinkel verwendet. Dieser wurde aus der fixierten Auflösung vom E-Papier und der Pixels-Per-Degree (PPD) von dem Bildschirm berechnet. Um die Helligkeit der Reize zu bestimmen, wurden die Reflexionsgrade für samtene Teile festgelegt. Der Reflexionsgrad von dem Hintergrund blieb dabei immer bei 0,0 oder 1,0 und der des Targets immer bei 0,5. Der Reflexionsgrad der Probe wurde anhand von 12 Werten bestimmt, wie in vorherigen Absatz beschrieben.

### **Apparate**

Für die Anzeige wurde das E-Papier von Visionect mit einer Auflösung von 1600 px × 1200 px und den Maßen 27 cm × 20,2 cm verwendet. Die Basis-Konfiguration von Backend-Verbindung des E-Papiers wurde von Aguilar (2017) genommen. E-Papier wurde in der Mitte einer schwarzen Tafel mit den Maßen 52 cm × 42 cm befestigt, welche senkrecht auf dem Schreibtisch platziert wurde. Das Samtbild hatte Abmessungen von 27 cm × 20,2 cm und einen Sehwinkel von 47,059 ° × 35,294 °. Die beiden grauen Vierecke beim SBC hatten Maßen von 5 cm × 5 cm und beim White von 3,375 cm × 6,73 cm, jeweils im Sehwinkel von 8,824 ° × 8,824 ° und 11,765 °. Für die grauen Vierecke von White wurde lediglich die Höhe angegeben, da die Breite auf ein Achtel der Bildbreite festgestellt wurde. Bei der Kalibrierung der Darstellung mit E-Papier war die Lichtinstallation von Bedeutung. Zwei LED-Lichtquellen, LED Pro 1000LF von ilux, wurden in einem Abstand von 50 cm vor dem E-Papier positioniert. Sie befanden sich jeweils 5 cm vom Schreibtisch entfernt. Eine Lichtquelle wurde links und eine weitere rechts vom Tisch platziert. Beide Lichtquellen wurden unter bestimmten Winkeln auf die Tafel gerichtet und ihre Intensität wurde auf Stufe 2 festgelegt. Die Abbildung 2.2 zeigt die resultierende Einrichtung für das Experiment mit E-Papier als Anzeigeform.



**Abb. 2.2:** Die Einrichtung für das Experiment mit dem E-Papier als Anzeigeform

### Kalibrieren

Nachdem insgesamt 50 Reize vorbereitet wurden, davon 2 Basisreize und 48 Probereize, wurden zunächst die Leuchtdichten der Reize auf dem E-Papier kontrolliert. Erreicht wurde dieses, durch die Veränderung von Winkel der Lichtquellen. Die Beleuchtungsstärke wurde dadurch angepasst und die Leuchtdichte konnte geregelt werden. Die Messung der Leuchtdichten wurde mittels des Photometers LS-100 von Konica Minolta durchgeführt, das sich etwa 1 m vom Reiz entfernt befand. Dafür wurde der Reiz nach Reflexionsgrad in Teilflächen unterteilt. Im Reiz von SBC gab es 5 Teilflächen: Die Tafel ( $B_G$ ), die Fläche in Schwarz ( $B_b$ ), die in Weiß ( $B_w$ ) und die zwei grauen Vierecke ( $T_b$  auf schwarzem Hintergrund,  $T_w$  auf weißem Hintergrund). Im Reiz von White gab es 11 Teilflächen: Die Tafel ( $B_G$ ), die zwei grauen Vierecke ( $T_b$  auf schwarzem Balken,  $T_w$  auf weißem Balken) und acht Balken ( $B_1$  bis  $B_8$ ).  $B_3$  und  $B_6$  entsprachen dabei jeweils  $B_b$  und  $B_w$ . Es wurde der Durchschnitt der Leuchtdichten von 3-5 Punkten der jeweiligen Teilfläche betrachtet.

Die Anpassung der Lichtquellen und die Messung der Leuchtdichte wurden wiederholt, bis beide grauen Vierecke dieselbe Leuchtdichte aufwiesen. Wenn die Leuchtdichte von  $T_b$  und  $T_w$  übereinstimmte, wurde die Einstellung der Lichtquellen festgelegt. Anschließend werden die Leuchtdichten der übrigen Teilflächen gemessen. Danach wurde ein einzelner Probereiz auf dem E-Papier angezeigt. Die Einstellung der Lichtquellen blieb dabei unverändert. Es wurden lediglich die Leuchtdichten von Target und Probe gemessen. Das Verfahren wurde zuerst für die Reize von SBC und dann für die Reize von White durchgeführt. Es gab jedoch unvermeidbare Abweichungen in den Leuchtdichten der beiden grauen Vierecke,  $\Delta L(T_b - T_w)$ . Die Abweichung betrug beim SBC 0,38 % und beim White

1,52 %. Die gemessenen Werte aller 48 Reize wurden im Abschnitt 2.2 zur Erzeugung der Reize auf dem Bildschirm verwendet. Die genauen Werte aus den Messungen sind in den Tabellen 5.1 bis 5.4 verfügbar. Dabei wurden die Leuchtdichtwerte mit  $L$  und Teilfläche in den Klammern bezeichnet.

## Durchlauf

Die Autorin (JP) und zwei naive Versuchspersonen (GA, SL) mit dem normalen oder korrigierten Sehvermögen nahmen an diesem Experiment teil. Es gab zwei unabhängige Variablen. Die erste unabhängige Variable war die Anzeigeform der Reize. Die zweite unabhängige Variable war der Reflexionsgrad der Probe. Es gab zwei Anzeigeformen, E-Papier und Bildschirm. Insgesamt gab es 12 Reflexionsgrade der Probe. Die ersten sechs Reflexionsgrade waren für die Reize, bei denen sich das Target auf weißem Hintergrund und die Probe sich auf schwarzem Hintergrund befand. Die anderen sechs waren für die umgekehrte Target- und Probepositionsverteilung. Insgesamt wurden 120 Versuche pro Reizart durchgeführt: 2 Target- und Probepositionsverteilungen  $\times$  6 Reflexionsgrade der Probe  $\times$  10 Wiederholungen. Jeder Experimentblock umfasste 120 Reize einer Reizart. Der erste Block enthielt Reize vom SBC und der zweite Block enthielt Reize vom White. Die Reize wurden in zufälliger Reihenfolge ohne zeitliche Begrenzung dargeboten.

Die Versuchspersonen saßen 90 cm vor dem E-Papier mit fixiertem Kopf. Sie sollten beurteilen, welches der beiden grauen Vierecke, links oder rechts, heller erschien. Zur Auswahl wurde das Gamepad von Microsoft verwendet. Nach der Entscheidung wurde der nächste Reiz nach circa drei Sekunde angezeigt. Als die Hälfte des Blockes (60 Durchgänge) vorbei war, wurde eine Pause eingelegt. Die Beleuchtungsstärke wurde vor Beginn jedes Blocks kontrolliert. Dazu wurden die Lichtquellen gemäß Abschnitt 2.1 so eingestellt, dass die beiden grauen Vierecke im Basisreiz der Reizart die gleiche Leuchtdichte aufwiesen. Vor dem ersten Block wurde dies mit dem Basisreiz vom SBC und vor dem zweiten Block mit dem Basisreiz vom White überprüft. Die Leuchtdichte vom Hintergrund blieb während des gesamten Durchlaufs konstant bei  $49,84 \text{ cd/m}^2$ .

## 2.2 Bildschirm als Anzeigeform

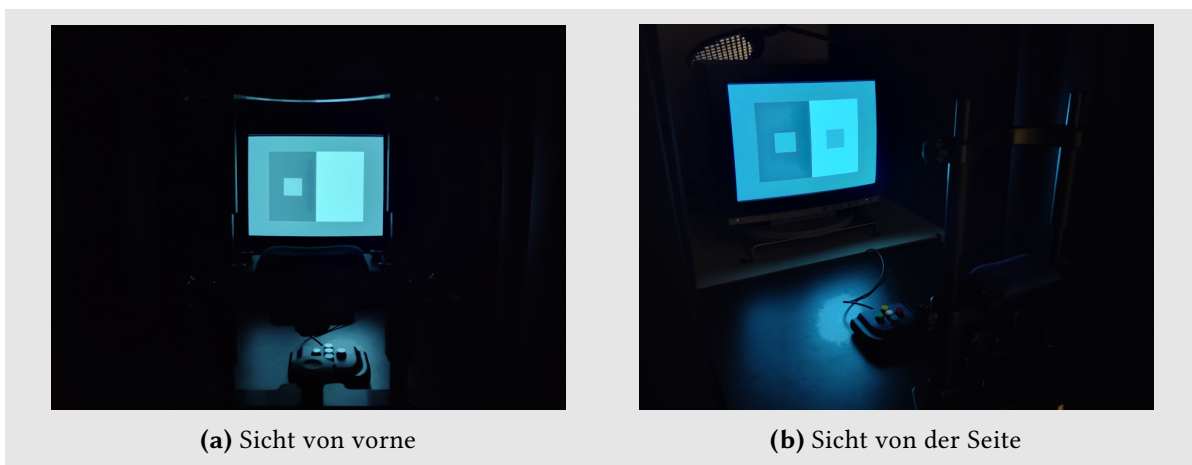
### Reize

Für das Experiment mit dem Bildschirm als Anzeigeform wurden dieselben 50 Reize wie im Experiment mit E-Papier als Anzeigeform verwendet. Die Reize wurden ebenfalls mit

Stimupy erzeugt, wobei die Leuchtdichten der Reize auf dem E-Papier als Grundlage dienten. Die Maße sollten auch dabei gleich bleiben.

### Apparate

Für die Darstellung der Reize wurde der Graustufen-CRT-Monitor von Siemens, Max Planck Sondertyp Modell (SMM 21106 LS), verwendet. Die maximale darstellbare Leuchtdichte auf dem Bildschirm betrug  $500 \text{ cd/m}^2$ . Die Auflösung betrug  $1024 \text{ px} \times 768 \text{ px}$  und die Maße betrug  $400 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$ . Der PPD-Wert betrug 34 bei einem Abstand von 88 cm zwischen dem Bildschirm und der Versuchsperson. Im Sehwinkel betrug die Größe der Reize  $20,962^\circ \times 15,939^\circ$ . Die beiden grauen Vierecke im SBC hatten eine Größe von  $4,009^\circ \times 4,009^\circ$  und die Höhe der grauen Vierecke im White betrug  $5,344^\circ$ . Die Abbildung 2.3 zeigt die resultierende Einrichtung für das Experiment mit dem Bildschirm als Anzeigeform. Zur Darstellung der Reize auf dem Bildschirm und zur Durchführung des Experiments wurden DataPixx von VPixx und das Python-Paket „HRL“ (2012, 8. November/n. d.) eingesetzt.

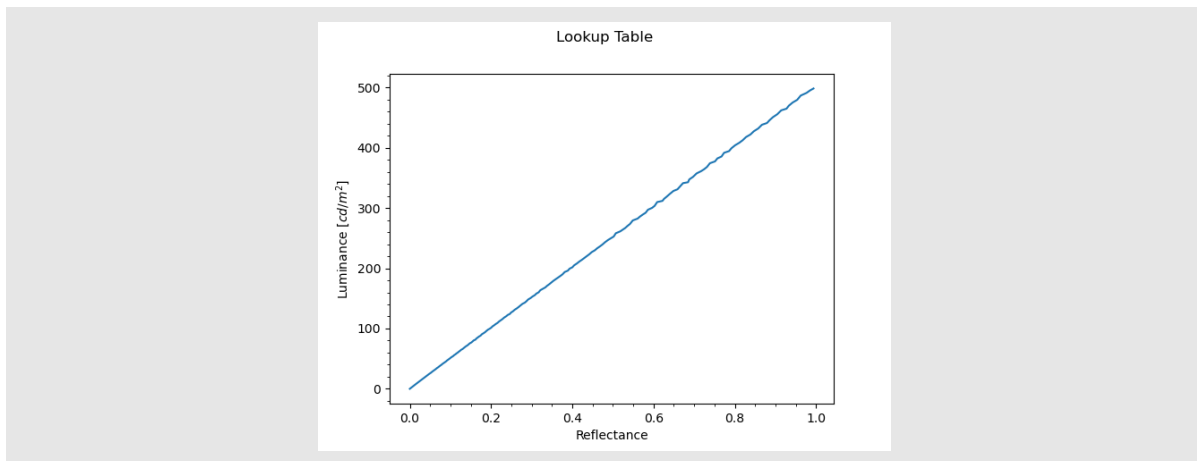


**Abb. 2.3:** Die Einrichtung für das Experiment mit dem Bildschirm als Anzeigeform

### Kalibrieren

Für das Experiment mit dem Bildschirm war es wichtig, dass es mit dem Experiment mit dem E-Papier als Anzeigeform vergleichbar war. Die Reize auf dem Bildschirm sollten die gleichen geometrischen und fotometrischen Eigenschaften aufweisen, wie sie auf dem E-Papier dargestellt wurden. Erstens musste die Maße des Reizes in beiden Anzeigeformen gleich sein. Zweitens sollten die Leuchtdichte der einzelnen Reize bei beiden Anzeigeformen gleich sein.

Um die gleiche Größe zu erreichen, sollten die Maße der Reize auf E-Papier manuell angepasst werden. Wenn die Maße ohne Anpassung eingegeben wurden, waren sie auf dem Bildschirm etwa 28 % kleiner als auf dem E-Papier, aufgrund der kurvigen Oberfläche des Bildschirms. Die Leuchtdichte wurde kontrolliert, um die fotometrische Gleichheit zu erreichen. Die Leuchtdichtewerte der Reize auf dem E-Papier wurden im vorherigen Abschnitt 2.1 gemessen. Die korrespondierenden Reflexionsgrade wurden durch die Parameterschätzung aus der Look-Up-Tabelle (LUT) des Bildschirms ermittelt und zur Erzeugung der Reize genutzt. Die Abbildung 2.4 zeigt die Visualisierung der LUT, die für die Parameterschätzung verwendet wurde. Die Reize wurden auf dem Bildschirm angezeigt und die Leuchtdichten in den Teilflächen gemessen. Es wurde überprüft, ob die Leuchtdichte der Reize auf dem Bildschirm mit den Leuchtdichten auf dem E-Papier übereinstimmte.

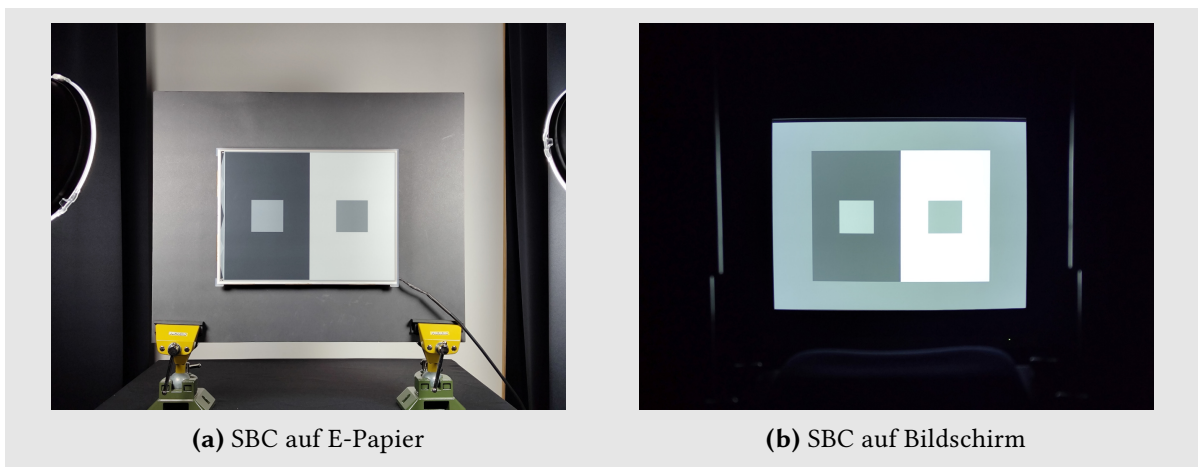


**Abb. 2.4:** LUT des Bildschirms vom 05.10.22. Es stammt aus dem Exemplar von HRL.

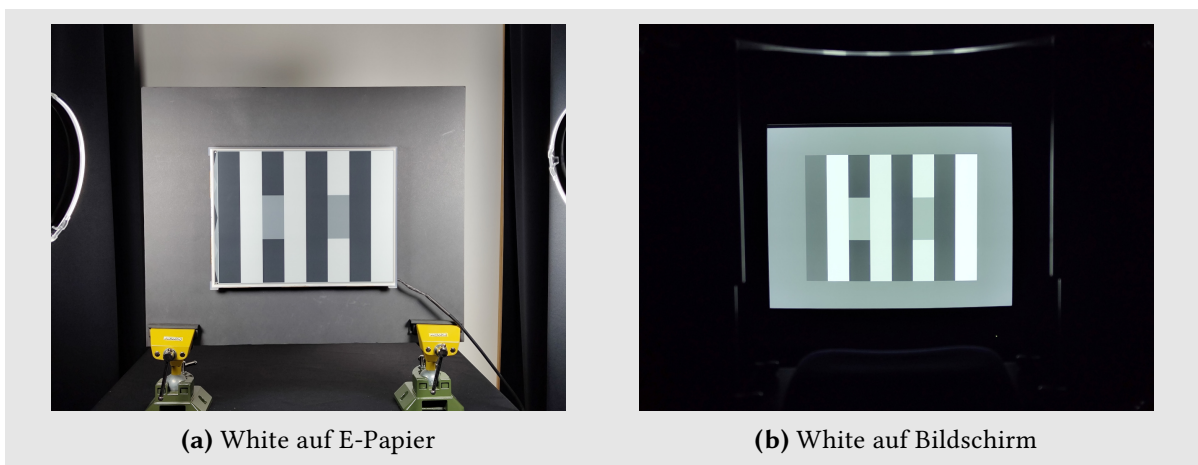
Die Maße auf dem Bildschirm und E-Papier wurden erfolgreich kalibriert. Allerdings unterschieden sich die Leuchtdichten. Die Abweichung wurde durch die Differenz der Leuchtdichte von dem E-Papier,  $L(E)$ , und dem Bildschirm,  $L(M)$ , bestimmt,  $\Delta L(E - M)$ . In 37 von 40 Fällen war die Leuchtdichte auf dem Bildschirm geringer als dem E-Papier. Der absolute Wert von  $\Delta L(E - M)$  war durchschnittlich 4,24 % für SBC und 2,3 % für White. Des Weiteren war  $\Delta L(T_b - T_w)$  beim SBC 1,51 % und beim White 2,54 %. Eine detaillierte Übersicht der exakten Werte ist in der Tabelle 5.1 bis 5.4 zu finden. Die Abbildung 2.5 und 2.6 zeigen die resultierenden Einrichtungen von beiden Anzeigeformen.

## Durchlauf

Die gleichen drei Versuchspersonen haben auch am Experiment mit dem Bildschirm teilgenommen, nachdem sie das Experiment mit E-Papier abgeschlossen hatten. Zwischen den beiden Experimenten gab es eine Pause. Der Durchlauf des Experiments war identisch zum E-Papier, wie im Abschnitt 2.1 beschrieben wurde. Die Auswahl zwischen links und rechts wurde mittels RESPONSEPixx von VPixx getroffen. Die Leuchtdichte vom Hintergrund blieb während des gesamten Durchlaufs konstant bei  $49,25 \text{ cd/m}^2$ .



**Abb. 2.5:** Basisreize von SBC bei beiden Anzeigeformen



**Abb. 2.6:** Basisreize von White bei beiden Anzeigeformen

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Psychometrische Funktion

Es gab insgesamt acht Bedingungen zum Überprüfen, die sich aus zwei Arten von Reizen (SBC oder White), zwei Verteilungen der Targetposition (auf weißem oder schwarzem Hintergrund) und zwei Anzeigeformen (E-Papier oder Bildschirm) ergaben. In jeder Bedingung wurde eine psychometrische Funktion erstellt, um den Point of Subjective Equality (PSE) und dessen Konfidenzintervall mit einem Konfidenzniveau von 95% zu ermitteln. Mit dem Python-Paket „Psignifit“ (2016, 1. April/n. d.) wurde die psychometrische Funktion erstellt und der PSE sowie das Konfidenzintervall bestimmt. Für jeden Proband wurden acht psychometrische Funktionen erstellt. Die Abbildungen 6.1 bis 6.3 zeigen die psychometrischen Funktionen jedes Probanden in acht verschiedenen Bedingungen dargestellt. Die x-Achse der psychometrischen Funktion zeigt die sechs Reflexionsgrade der Probe. Die y-Achse zeigt es in Proportion, wie oft die Probe von den zehn Wiederholungen als heller wahrgenommen und daher ausgewählt wurde. Der PSE ist der Reflexionsgrad der Probe, wobei die Häufigkeit von *Probe Gewählt* bei 50% lag. Das bedeutet, dass das Target und die Probe bei diesem Reflexionsgrad ähnlich hell aussahen. Die Probe war also ausreichend hell, wenn das Target auf dem weißen Hintergrund und ausreichend dunkel, wenn das Target auf dem schwarzen Hintergrund war. Die resultierenden PSE-Werte sind in den Tabellen 5.5 und 5.6 verfügbar. Der Absolutwert von der Differenz zwischen 0,5 und PSE zeigte die Magnitude des Effektes. In Tabelle 5.7 und 5.8 sind die Magnituden und die Differenzen der Magnituden nach Bedingung dargestellt. Die Magnitude des Effektes waren tendenziell größer beim SBC und auf dem Bildschirm. Es sah im ersten Blick so aus, als ob es einen wesentlichen Unterschied gegeben hätte. Der Vergleich der Magnituden wurde jedoch mithilfe der Konfidenzintervalle durchgeführt, weil es nicht legitim wäre, den Unterschied mit einem Punkt (PSE) zu beurteilen.

Aus den sechs Probe-Reflexionsgraden ergaben sich sechs Datenpunkte auf der psychometrischen Funktion. In zwei Fällen waren jedoch zusätzliche Versuche erforderlich, da der PSE mit den ersten 6 Reflexionsgraden nicht bestimmt werden konnte. Um die psychometrische Funktion zu erweitern und damit den PSE zu bestimmen, wurden bei



jedem Fall zwei zusätzliche Versuche durchgeführt. Der erste Fall trat bei Proband 1 unter der Bedingung von E-Papier als Anzeigeform und Target auf schwarzem Hintergrund in White auf. Die Funktion wurde erweitert, indem die Reflexionsgrade der Probe von 0,53 und 0,56 berücksichtigt wurden. Die erweiterte Funktion ist in Abbildung 6.1g dargestellt. Der zweite Fall trat bei Proband 1 und Proband 2 auf, als der Reiz von SBC auf dem Bildschirm angezeigt wurde und das Target auf schwarzem Hintergrund stand. Die Funktionen wurden ebenfalls erweitert, unter Berücksichtigung der Reflexionsgrade der Probe von 0,93 und 0,96. Die erweiterten Funktionen sind in Abbildung 6.1d und 6.2d zu finden. In zwei Fällen wurde der zusätzliche Versuch aus zeitlichem Grund nicht durchgeführt, obwohl die Erweiterung notwendig gewesen wäre. Es handelte sich um den Reiz von SBC mit dem Target auf schwarzem Hintergrund, der bei Proband 1 und Proband 3 auf dem Bildschirm gezeigt wurde. Die Abbildung 6.1b und 6.3b zeigen die Fälle.

## 3.2 Konfidenzintervalle

Für jeden PSE-Wert wurde ein 95%-Konfidenzintervall erstellt. Um die beiden Anzeigeformen unter gleichen Bedingungen zu vergleichen, wurden zwei Konfidenzintervalle gleicher Reizart und Target- und Probepositionsverteilung nebeneinander visualisiert. Es wurden insgesamt vier Abbildungen für jeden Probanden erstellt. Die Abbildungen 6.4 bis 6.9 zeigen den Vergleich der Konfidenzintervalle zwischen E-Papier und Bildschirm, je nach Target- und Probeposition und Reizart. Es wurde untersucht, ob die beiden Konfidenzintervalle von E-Papier und Bildschirm voneinander komplett abweichend sind. Wenn die beiden Intervalle keinen Überlappungsbereich aufweisen, gibt es einen signifikanten Unterschied in der Magnitude der beiden Effekte zwischen den beiden Anzeigeformen. Wie aus den Abbildungen 6.4 bis 6.9 hervorging, gab es keinen wesentlichen Unterschied in der Magnitude sowohl beim SBC als auch beim White.

## 4 Diskussion

Die Arbeit beginnt mit der Frage, ob die Magnitude der Effekte in der Helligkeitswahrnehmung bei einer der beiden Anzeigeformen größer ist, bezogen auf Lightness und Brightness. Im Verlauf des Experiments wurde deutlich, dass der Schwerpunkt der Arbeit darauf liegt, die Experimente beider Anzeigeformen überhaupt vergleichbar zu machen. Das fotometrische Kalibrieren spielte eine wesentliche Rolle und stellte eine Herausforderung dar. Nichtsdestotrotz waren die Experimente beider Anzeigeformen vergleichbar. Im folgenden Abschnitt werden die beiden Punkte diskutiert, die Schwierigkeiten bereiteten und wie dies die Experimente beeinflusst hatten.

### 4.1 Abweichung in Leuchtdichten

Eine Herausforderung bei der fotometrischen Kalibrierung war, dass die Leuchtdichte nicht exakt gleich bei beiden grauen Vierecken innerhalb des Reizes sowie bei beiden Anzeigeformen eingestellt werden konnte. Deshalb wurde beim Kalibrieren des Experiments angenommen, dass eine Abweichung von etwa 5 % akzeptabel wäre. Die Tabellen 5.1 bis 5.4 zeigen zwei interessante Merkmale der Abweichungen in Leuchtdichten. Zum einen gab es Differenzen in den Leuchtdichten zwischen E-Papier und Bildschirm,  $\Delta L_{E-M}$ , wenn die Reize vom E-Papier auf den Bildschirm übertragen wurden. Zum anderen weichte  $\Delta L_{E-M}$  je nach Komponente bzw. Reflexionsgrad unterschiedlich ab.

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, wurde die gemessene Leuchtdichte auf dem E-Papier durch die Parameterschätzung aus der LUT in den Reflexionsgrad umgewandelt und die Reflexionsgrade wurden zur Erzeugung der Reize auf dem Bildschirm verwendet. Obwohl keine zusätzlichen Anpassungen vorgenommen wurden, gab es dennoch Unterschiede in den Leuchtdichten. In den meisten Fällen war die Leuchtdichte höher bei E-Papier ( $\Delta L_{E-M} > 0$ ). Das bedeutet, dass die Teilflächen durch die Umwandlung dunkler wurden und auf E-Papier heller waren. Beim SBC war  $\Delta L_{E-M}$  im Vergleich zum White relativ größer. Bei den schwarzen Teilflächen war die Abweichung kleiner als bei den weißen Bereichen, sowohl im SBC als auch im White. Beim White betrug die Abweichung sogar einen negativen Wert, d.h. die Leuchtdichte auf dem Bildschirm war ab dem bestimmten Reflexionsgrad größer

als bei dem E-Papier ( $B_b$  und  $B_5$  in der Tabelle 5.3). Die Abweichung lag am kleinsten bei der Probe im Reiz des Whites mit einem Reflexionsgrad von 0,16 auf weißem Hintergrund und bei 0,1% (siehe Tabelle 5.4). Obwohl die Abweichungen bei Reize vom White relativ geringer war, wies  $B_8$  im Reiz vom White die größte Abweichung mit 6,97% auf.

Wie die LUT erstellt wurde, könnte die Abweichung verursacht haben. Die LUT wurde so erstellt, dass das einfarbige Viereck in der Mitte des Bildschirms positioniert wurde und dessen Leuchtdichte schrittweise gemessen wurde. Allerdings haben SBC und White mehrere Teilflächen, im Gegensatz zu einem einfarbigen Viereck. Sie sind komplexer. Die Teilflächen mit den unterschiedlichen Reflexionsgraden innerhalb des Reizes könnten miteinander interagiert haben. Dadurch könnten die Leuchtdichten beeinflusst worden sein. Dies könnte zu Abweichungen in den Leuchtdichten geführt haben.

Eine weitere Ursache konnte durch eine Beobachtung der Reflexion aufgezeigt werden. In Abschnitt 2.1 wurde eine schwarze Tafel vorgestellt, auf die das E-Papier geschraubt wurde. Bevor die Farbe der Tafel festgelegt wurde, wurde deren Oberfläche zuerst mit einer weißen Schicht Papier abgedeckt. Die Leuchtdichte der Reize von SBC und White wurde kontrolliert. Die Reize von SBC hatten einen weißen Hintergrund auf der linken Seite und schwarz auf der rechten Seite. Target und Probe hatten außerdem immer denselben Reflexionsgrad. Es gab 11 Reize pro Reizart mit dem Reflexionsgrad der Target und Probe von 0,0 bis 1,0 mit einer Schrittweite von 0,1 (0,0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0). Das Ziel der Kontrolle bestand darin, sicherzustellen, dass das Target und die Probe bei jedem Reflexionsgrad die gleiche Leuchtdichte aufweisen, um die Atmospheric Transfer Function (ATF) des E-Papiers zu bestimmen. Es wurde beobachtet, dass die Differenz der Leuchtdichten zwischen Target und Probe ( $\Delta L_{T-P}$ ) sich vollständig ändert, wenn sich der Reflexionsgrad ändert. Um die Leuchtdichte beider Vierecke auszugleichen, musste die Lichteinstellung je nach Reiz angepasst werden. Die Änderung von  $\Delta L_{T-P}$  war geringer, als die Tafel mit schwarzem Papier abgedeckt wurde. Die Farbe der Tafel wurde deshalb mit Schwarz entschieden. Diese Beobachtung legt nahe, dass die Oberfläche mit höherem Reflexionsgrad die Leuchtdichte stärker beeinflusst hat als die mit niedrigerem Reflexionsgrad. Es entspricht außerdem der zweiten Variante der Lightness-Konstanz. Wie in Abschnitt 1.1 beschrieben, wirkt die Umgebung einer Fläche wie die Beleuchtung. Dies könnte eine Erklärung für die Unterschiede im Verhältnis von  $\Delta L_{E-M}$  in verschiedenen Bereichen sein, obwohl die LUT unverändert angewendet wurde.

Daraus folgen einige Aussagen mit offenen Fragen. Je höher der Reflexionsgrad ist, desto stärker beeinflusst er die Leuchtdichte der Fläche. Diese Aussage stimmt mit der Gleichung der Helligkeitskonstanz überein, wonach die Leuchtdichte durch die Interaktion zwischen dem Reflexionsgrad der Oberfläche und der Beleuchtungsstärke bestimmt wird (siehe

Gleichung 1.1 in Abschnitt 1.1). Wenn die Beleuchtungsstärke konstant bleibt, die Reflexion jedoch höher wird, erhöht sich die Leuchtdichte. Die Leuchtdichte einer Teilfläche auf einem komplexeren Bild weicht von der Leuchtdichte der Fläche auf einem einfacheren Bild mit dem gleichen Reflexionsgrad ab. Die Komponenten mit unterschiedlichen Reflexionsgraden innerhalb des Bildes könnten miteinander interagiert haben. Das genaue Prinzip dieser Interaktion sollte weiter untersucht werden.

## 4.2 Beleuchtung

Beim Experiment wurde nur eine Anordnung von zwei grauen Vierecken in den Reizen verwendet. Das linke graue Viereck befand sich immer auf schwarzem Hintergrund und das rechte Viereck auf weißem Hintergrund. Als der Reiz umgedreht wurde, änderte sich die Leuchtdichte, obwohl die Lichteinstellung gleich blieb. Eine Umdrehung bezieht sich hierbei auf den Wechsel der Hintergrundfarbe von Schwarz zu Weiß und von Weiß zu Schwarz. Das Endergebnis der Umdrehung war ein graues Viereck auf weißem Hintergrund links und ein weiteres auf schwarzem Hintergrund rechts. Die Leuchtdichte vom grauen Viereck auf der linken Seite wurde von  $115 \text{ cd/m}^2$  auf  $107,7 \text{ cd/m}^2$  reduziert, während sie auf der rechten Seite von  $114 \text{ cd/m}^2$  auf  $124,9 \text{ cd/m}^2$  erhöht wurde. Die Leuchtdichten sollten durch eine Änderung des Winkels der Lichtquellen wieder angeglichen werden. Die Anpassung der Lichtquellen während des Experiments durch einen Reiz nach dem anderen, wäre jedoch zu kompliziert und somit unmöglich. Daher blieb die Anordnung bei einer Koordination.

Die Kontrolle der Beleuchtung mit zwei grob steuerbaren Lichtquellen war zwar herausfordernd, aber nicht unmöglich. Wenn jedoch eine noch feinere Steuerung der Beleuchtungsstärke erforderlich wäre, wie im Beispiel mit der Umdrehung, würde dies nicht ausreichen. Ein vollständiges Experiment könnte möglich sein, wenn die Beleuchtung durch fein-regulierbare LEDs gesteuert worden wäre. Außerdem wäre es effektiver gewesen, die Beleuchtung allgemein zu steuern, indem die Lichteinstellung vorprogrammiert und je nach Bedingungen automatisch angepasst worden wäre.

In Abschnitt 1.3 wurden über drei Beurteilungsarten der Lightness gesprochen. Die dritte Beurteilungsart wurde hierbei betrachtet. Wenn die Beleuchtung auf die Anzeige in verschiedenen Bereichen offensichtlich ungleichmäßig ist, hängt die Beurteilung der Reflexionsgrade von Brightness oder Brightness-Kontrast ab. Die Beleuchtung auf dem E-Papier war nicht gleichmäßig verteilt, da die Lichtquellen beim Experiment mit E-Papier als Anzeigeform wie in der Abbildung 2.2 eingerichtet wurden. Dies kann man auch in den Abbildungen 2.5a und 2.6a erfahren. Genau auf diese Situation bezieht sich die geschätzte

Lightness, die sich vom Brightness oder Brightness-Kontrast beeinflussen lässt. Die Ergebnisse zeigen, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Magnitude des SBC und White zwischen E-Papier und Bildschirm gibt. Dies kann durch die geschätzte Lightness erklärt werden. Es wurde angenommen, dass die Reize auf dem E-Papier als Anzeigeform Lightness aufwiesen. Wenn Lightness jedoch, aufgrund der sichtbaren ungleichen Verteilung der Beleuchtung, der geschätzten Lightness entsprochen hat, war diese Annahme nicht ganz korrekt. Lightness war in dem Fall die geschätzte Lightness, die Brightness oder Brightness-Kontrast relevant war. Die Ergebnisse hätten daher keinen wesentlichen Unterschied gezeigt.

Die Wahl und die Installation der Lichtquellen spielt also eine wichtige Rolle. Die grob steuerbaren Lichtquellen wurden im Experiment winkelig vor dem Reiz installiert. Allerdings war es nicht möglich, sie fein und fern zu steuern, weshalb das vollständige Experiment nicht leicht durchgeführt werden konnte. Eine gleichmäßige Verteilung der Beleuchtung auf die Anzeige war ebenfalls nicht möglich. Es bleibt eine offene Frage bezüglich der Beleuchtung, ob die Ergebnisse anders ausgefallen wären, wenn das Experiment im Allgemeinen präziser durchgeführt worden wäre. Wenn die Beleuchtung auf dem E-Papier gleichmäßig verteilt worden wäre oder die ungleiche Verteilung nicht sichtbar gewesen wäre, hätte Lightness als wahrgenommener Reflexionsgrad untersucht werden können.

### 4.3 Fazit

Ziel der Arbeit war es, beim Vergleich der Anzeigarten festzustellen, ob es einen Unterschied in der Magnitude der Effekte auf die Helligkeitswahrnehmung gibt. Die Ergebnisse zeigen, dass kein Unterschied festgestellt werden konnte. Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Experimente mit E-Papier als Anzeigeform die geschätzte Lightness bewertet hätten. Die geschätzte Lightness kann nicht vollständig von der Brightness getrennt betrachtet werden. Dies bringt uns zurück zum Thema: Lightness und Brightness.

Es gab einige Studien, in denen Lightness und Brightness zusammen in einer Studie erforscht wurden, wie im Abschnitt 1.3 gezeigt wurde. Arend und Spehar (1993a,1993b) und Blakeslee und McCourt (2003) zeigten, dass Lightness in den speziellen Fällen von Brightness beeinflusst werden könnte. Blakeslee und McCourt schlagen des Weiteren vor, dass Lightness als allgemeiner Begriff bezüglich Reflexionsgrad benutzt werden könnte und Brightness oder Brightness-Kontrast spezifisch für eine Beurteilung der sensorischen Qualität benutzt werden könnte. Gilchrist (2006) und Murray (2021) argumentieren, dass die Nuancen der Lightness und Brightness klar dargestellt und weiter erforscht werden

sollten. Es bleibt eine offene Frage, wie sich Lightness und Brightness genau zueinander verhalten, wie von Murray (2021) diskutiert. Er wies darauf hin, dass der Grund dafür zum Teil daran liegt, dass sie sich oft unabhängig voneinander entwickelt haben.

Um die Beziehung zwischen Lightness und Brightness weiter zu erforschen, ist zu überlegen, ob die Experimente nicht nur auf dem Bildschirm sondern auch auf der Anzeigeform ohne selbstleuchtende Oberfläche durchgeführt werden sollten. Agostini und Bruno (1996) haben die Reize mit Papier- und Leuchtmitteln untersucht, um sie mit den Reizen auf dem Bildschirm zu vergleichen. E-Papier ermöglicht eine bessere Kontrolle über Reize im Vergleich zu traditionellem Papier. Aufgrund dieses Vorteils könnte E-Papier in zukünftigen Lightness-Forschungen verwendet werden. Dabei sollte jedoch sorgfältig auf die Beleuchtung geachtet werden.

## 5 Tabelle

### Leuchtdichte Messungen

	E-Papier	Monitor	$\Delta L(E - M)$
	$cd/m^2$	$cd/m^2$	%
$B_G$	49.89	49.25	1.28
$B_b$	22.85	22.34	2.21
$T_b$	89.42	84.87	5.09
$B_w$	269.04	255.05	5.20
$T_w$	89.76	86.15	4.03

**Tab. 5.1:** SBC: Leuchtdichte Messungen vom Basisreiz in zwei Anzeigeformen und Abweichungen in Prozent

Positionierung	Reflexionsgrad der Probe	E-Papier	Monitor	$\Delta L(E - M)$
		$cd/m^2$	$cd/m^2$	%
Target auf Weiß Probe auf Schwarz	0.1	26.73	25.73	3.74
	0.16	33.54	32.11	4.26
	0.22	42.79	40.60	5.12
	0.28	50.18	47.84	4.66
	0.34	57.55	54.60	5.13
	0.4	71.07	67.49	5.04
Target auf Schwarz Probe auf Weiß	0.6	122.60	117.30	4.32
	0.66	130.10	124.50	4.30
	0.72	151.80	144.60	4.74
	0.78	193.50	184.70	4.55
	0.84	218.40	209.50	4.08
	0.9	246.30	235.60	4.34

**Tab. 5.2:** SBC: Leuchtdichte Messungen der Probereize in zwei Anzeigeformen und Abweichungen in Prozent

	E-Papier	Monitor	$\Delta L(E - M)$
	$cd/m^2$	$cd/m^2$	%
$B_G$	49.79	49.25	1.09
$B_1$	33.09	32.94	0.44
$B_2$	289.30	277.6	4.04
$B_b$	21.39	21.66	-1.25
$T_b$	88.71	85.88	3.18
$B_4$	246.87	240.9	2.42
$B_5$	19.96	20.42	-2.30
$B_w$	250.92	241.1	3.91
$T_w$	90.05	88.06	2.21
$B_7$	23.96	23.77	0.81
$B_8$	332.03	308.9	6.97

**Tab. 5.3:** White: Leuchtdichte Messungen vom Basisreiz in zwei Anzeigeformen und Abweichungen in Prozent

Positionierung	Reflexionsgrad der Probe	E-Papier	Monitor	$\Delta L(E - M)$
		$cd/m^2$	$cd/m^2$	%
Target auf Weiß Probe auf Schwarz	0.1	27.22	27.53	-1.16
	0.16	33.56	33.52	0.10
	0.22	42.91	42.31	1.39
	0.28	50.47	49.66	1.60
	0.34	56.84	55.42	2.49
	0.4	71.33	69.38	2.73
Target auf Schwarz Probe auf Weiß	0.6	122.15	118.7	2.82
	0.66	128.55	125.6	2.29
	0.72	153.55	149.2	2.83
	0.78	190.65	186.4	2.23
	0.84	217.25	212.3	2.28
	0.9	246.70	241.1	2.27

**Tab. 5.4:** White: Leuchtdichte Messungen der Probereize in zwei Anzeigeformen und Abweichungen in Prozent



**PSE**

Reizart	SBC			
Positionierung	Target auf Weiß Probe auf Schwarz		Target auf Schwarz Probe auf Weiß	
	Anzeigeform	E-Papier	Bildschirm	E-Papier
Proband 1	0.110	0.032	0.884	0.920
Proband 2	0.207	0.184	0.878	0.920
Proband 3	0.096	0.046	0.769	0.846

**Tab. 5.5:** SBC: PSE-Werten

Reizart	White			
Positionierung	Target auf Weiß Probe auf Schwarz		Target auf Schwarz Probe auf Weiß	
	Anzeigeform	E-Papier	Bildschirm	E-Papier
Proband 1	0.397	0.312	0.564	0.697
Proband 2	0.347	0.363	0.654	0.703
Proband 3	0.237	0.302	0.642	0.668

**Tab. 5.6:** White: PSE-Werten**Magnitude des Effektes**

Reizart	SBC					
Positionierung	Target auf Weiß Probe auf Schwarz			Target auf Schwarz Probe auf Weiß		
	Anzeigeform	E-Papier	Bildschirm	Differenz	E-Papier	Bildschirm
Proband 1	0.390	0.468	-20.00 %	0.384	0.420	-9.38 %
Proband 2	0.293	0.316	-7.85 %	0.378	0.420	-11.11 %
Proband 3	0.404	0.454	-12.38 %	0.269	0.346	-28.62 %

**Tab. 5.7:** SBC: Die Magnitude des Effektes auf zwei Anzeigeformen und Differenz

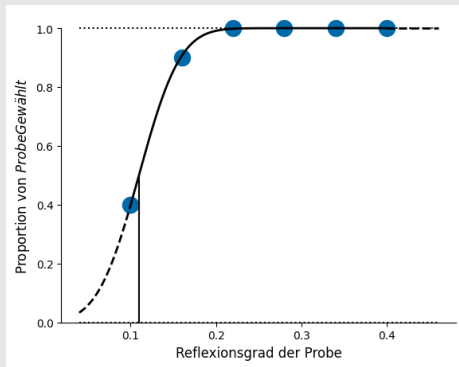
---

Reizart	White					
Positionierung	Target auf Weiß Probe auf Schwarz			Target auf Schwarz Probe auf Weiß		
	Anzeigeform	E-Papier	Bildschirm	Differenz	E-Papier	Bildschirm
Proband 1	0.103	0.188	-82.52 %	0.064	0.197	-207.81 %
Proband 2	0.153	0.137	10.46 %	0.154	0.203	-31.82 %
Proband 3	0.263	0.198	24.71 %	0.142	0.168	-18.31 %

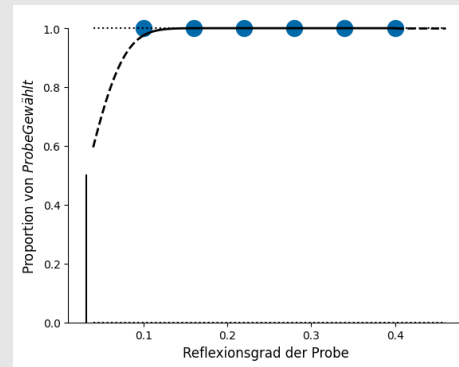
**Tab. 5.8:** White: Die Magnitude des Effektes auf zwei Anzeigeformen und Differenz



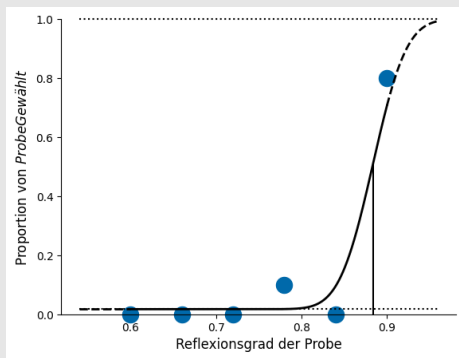
## 6 Grafiken



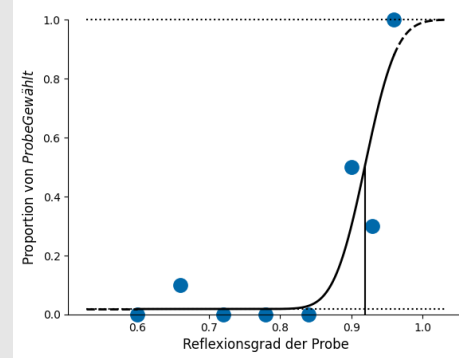
(a) E-Papier,  $T_W$ , SBC



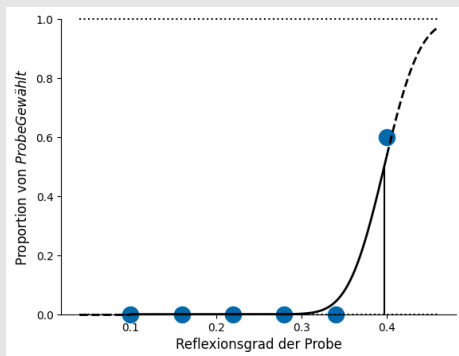
(b) Bildschirm,  $T_W$ , SBC



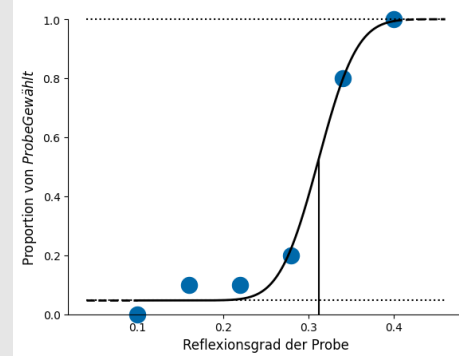
(c) E-Papier,  $T_B$ , SBC



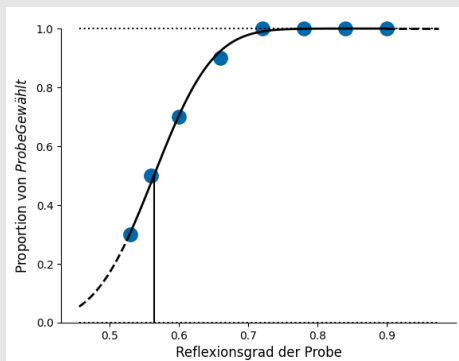
(d) Bildschirm,  $T_B$ , SBC



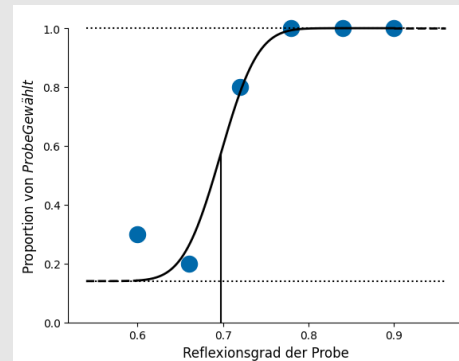
(e) E-Papier,  $T_W$ , White



(f) Bildschirm,  $T_W$ , White



(g) E-Papier,  $T_B$ , White



(h) Bildschirm,  $T_B$ , White

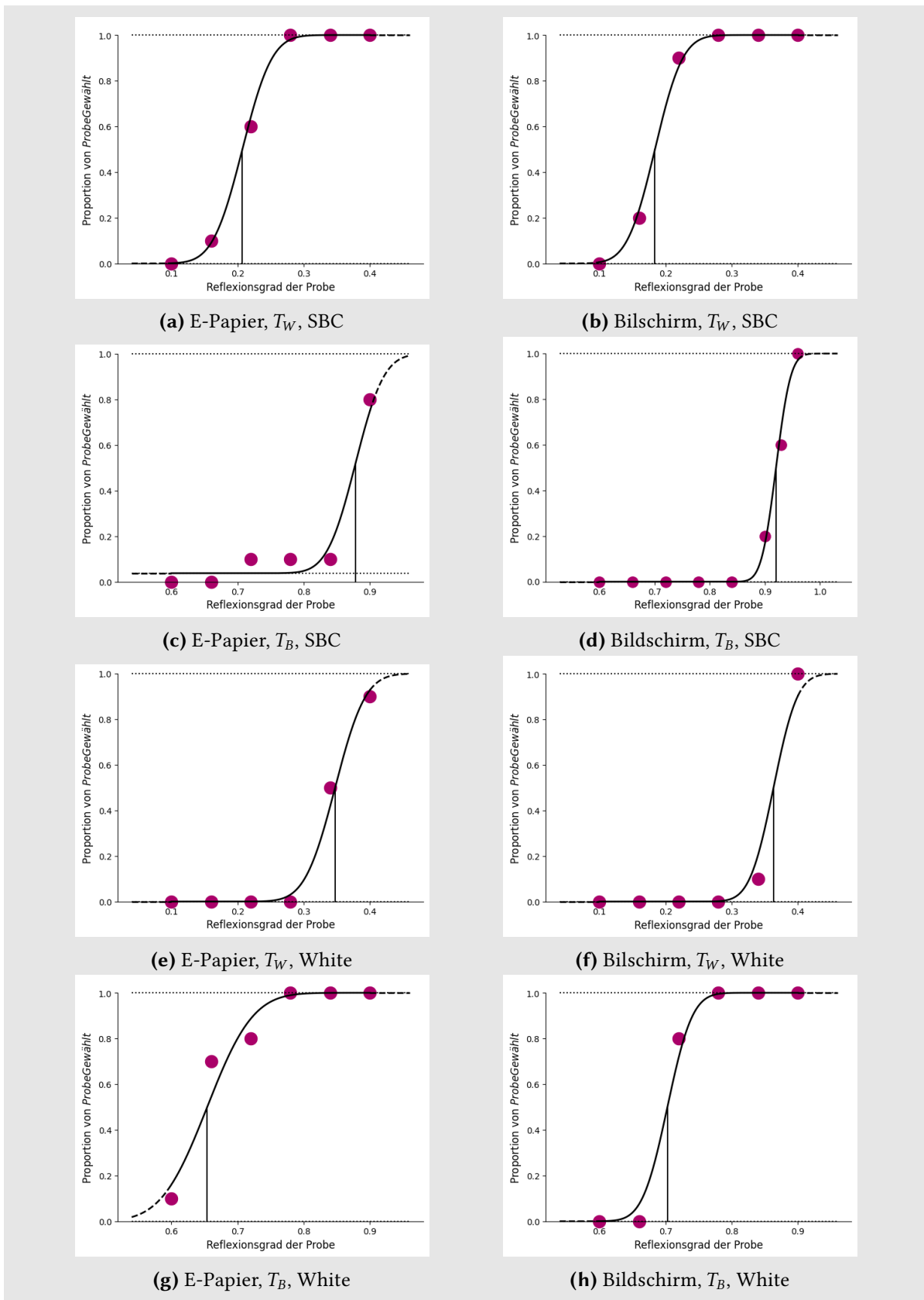
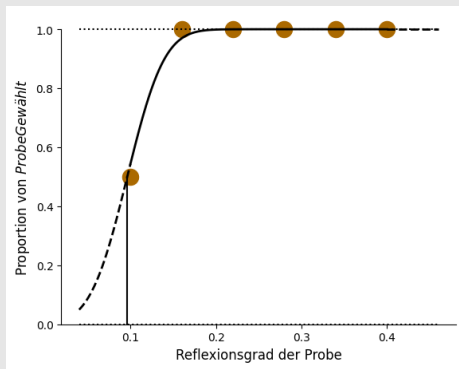
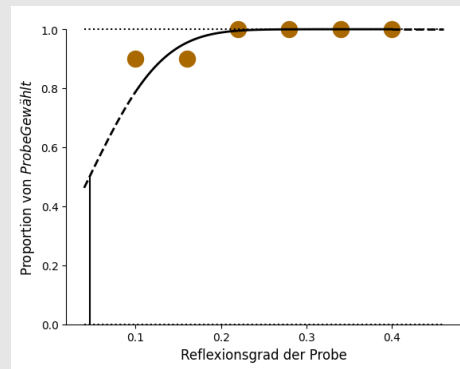


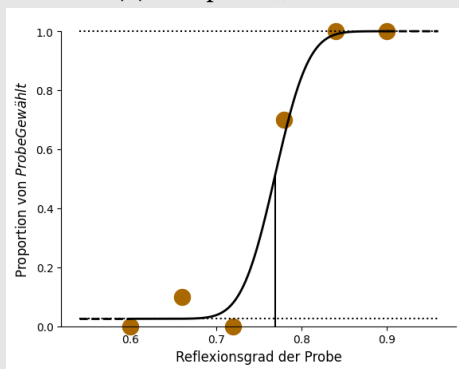
Abb. 6.2: Psychometrische Funktionen, Proband 2



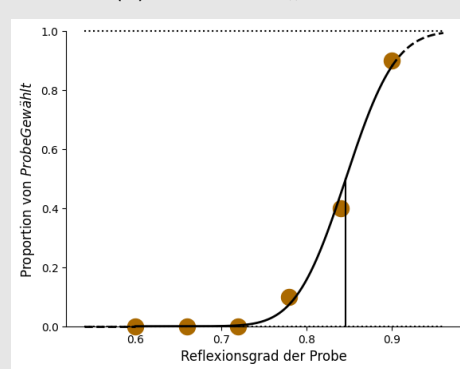
(a) E-Papier,  $T_W$ , SBC



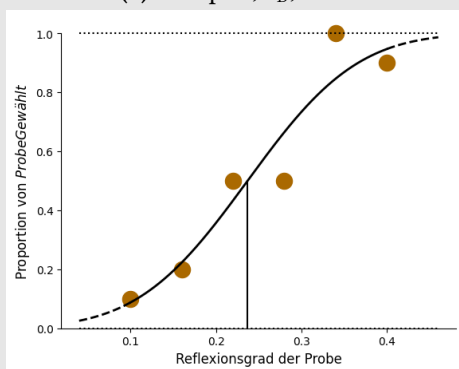
(b) Bildschirm,  $T_W$ , SBC



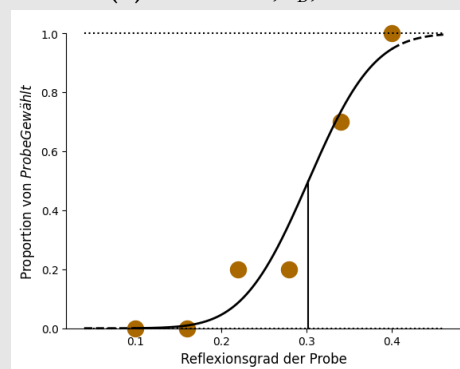
(c) E-Papier,  $T_B$ , SBC



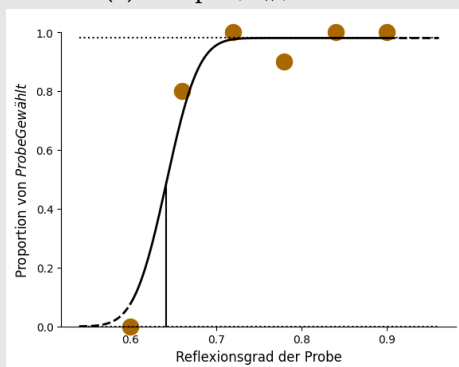
(d) Bildschirm,  $T_B$ , SBC



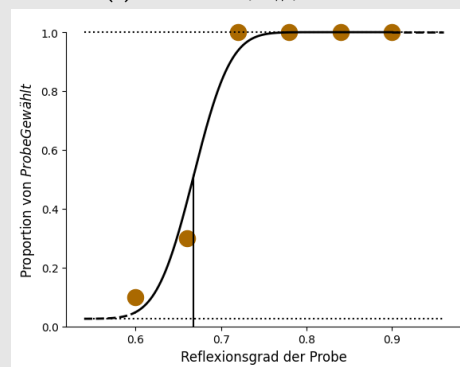
(e) E-Papier,  $T_W$ , White



(f) Bildschirm,  $T_W$ , White



(g) E-Papier,  $T_B$ , White



(h) Bildschirm,  $T_B$ , White

Abb. 6.3: Psychometrische Funktionen, Proband 3

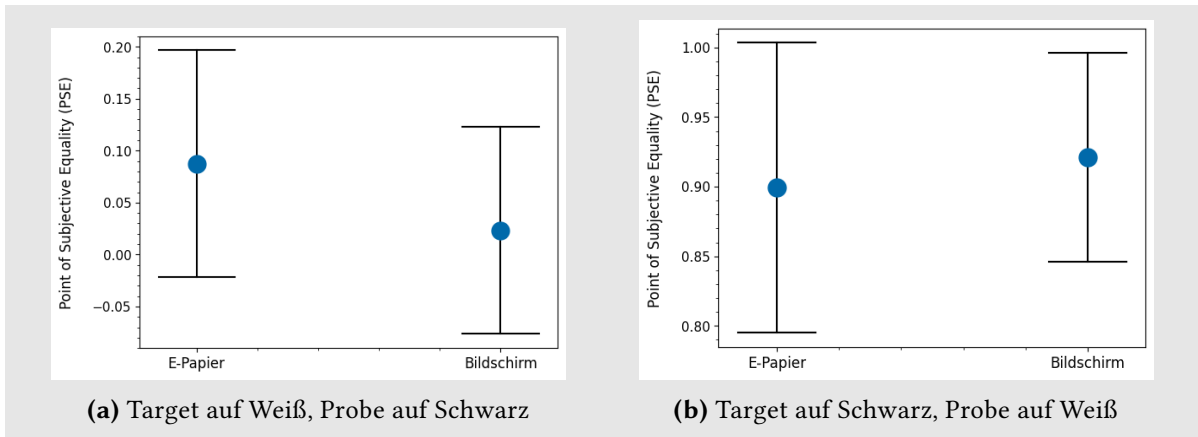


Abb. 6.4: Proband 1, SBC: Vergleich des 95% Konfidenzintervalls zwischen zwei Anzeigenformen

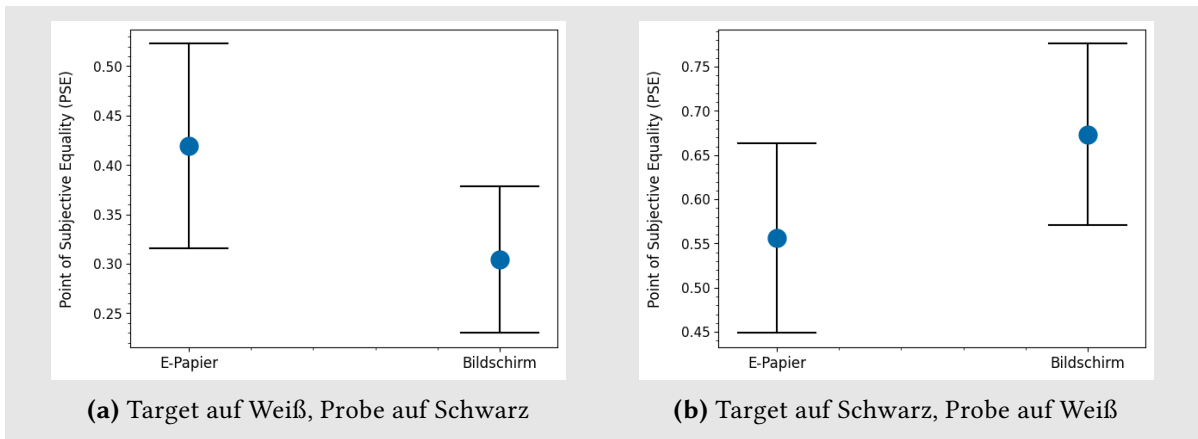
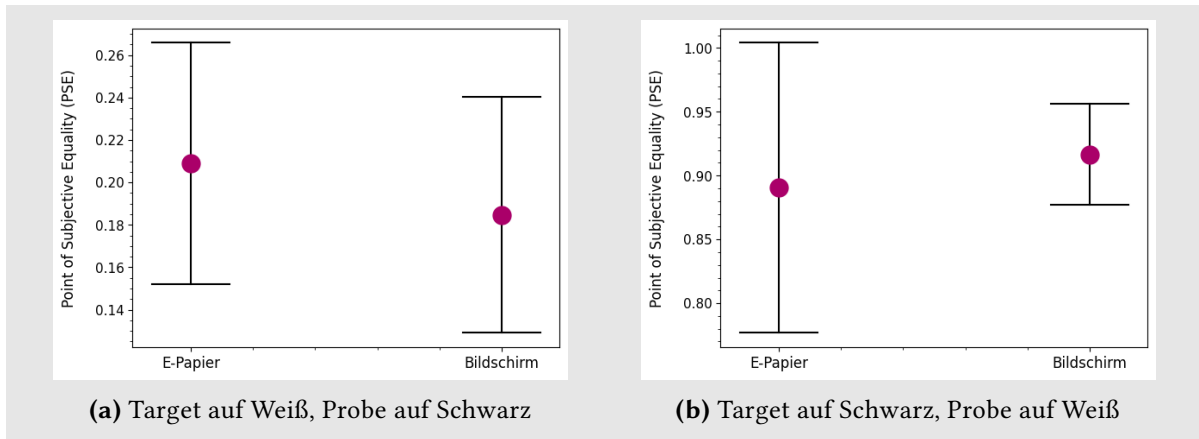
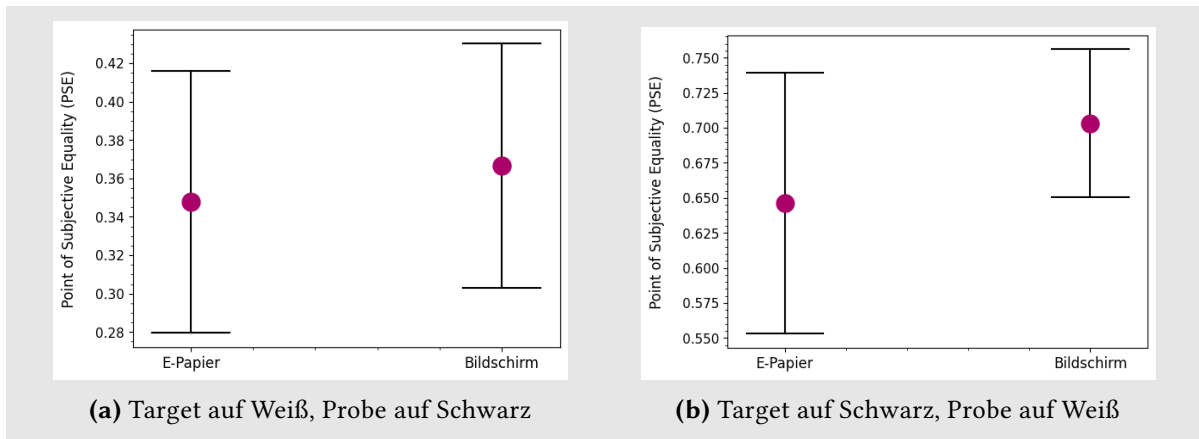


Abb. 6.5: Proband 1, White: Vergleich des 95% Konfidenzintervalls zwischen zwei Anzeigenformen



**Abb. 6.6:** Proband 2, SBC: Vergleich des 95% Konfidenzintervalls zwischen zwei Anzeigenformen



**Abb. 6.7:** Proband 2, White: Vergleich des 95% Konfidenzintervalls zwischen zwei Anzeigenformen



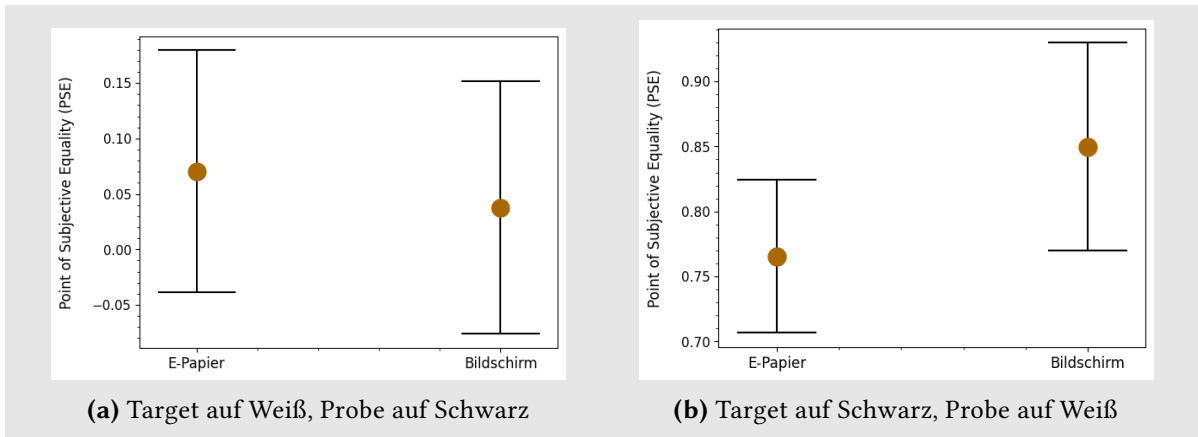


Abb. 6.8: Proband 3, SBC: Vergleich des 95% Konfidenzintervalls zwischen zwei Anzeigenformen

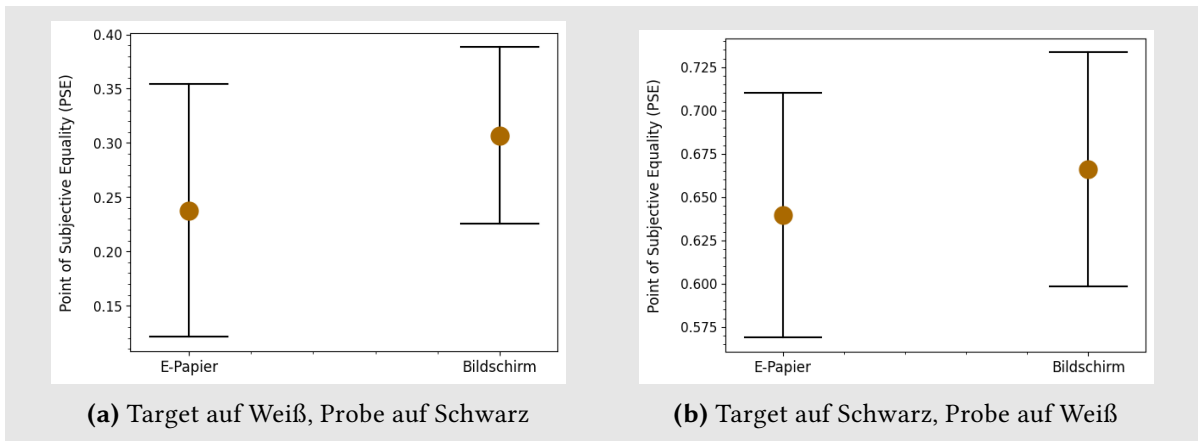


Abb. 6.9: Proband 3, White: Vergleich des 95% Konfidenzintervalls zwischen zwei Anzeigenformen, Proband 3

## Literatur

- Agostini, T., & Bruno, N. (1996): Lightness contrast in CRT and paper-and-illuminant displays. *Perception & Psychophysics*, 58(2), 250–258. <https://doi.org/10.3758/BF03211878>
- Aguilar, G. (2017): On the use of MLDS in the study of depth and lightness perception.
- Arend, L. E. (1993): Mesopic lightness, brightness, and brightness contrast.
- Arend, L. E., & Goldstein, R. (1987): Lightness models, gradient illusions, and curl. *Perception & Psychophysics*, 42(1), 65–80. <https://doi.org/10.3758/BF03211515>
- Arend, L. E., & Goldstein, R. (1990): Lightness and brightness over spatial illumination gradients. *JOSA A*, 7(10), 1929–1936. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.7.001929>
- Arend, L. E., & Spehar, B. (1993a): Lightness, brightness, and brightness contrast: 1. Illuminance variation. *Perception & Psychophysics*, 54(4), 446–456. <https://doi.org/10.3758/BF03211767>
- Arend, L. E., & Spehar, B. (1993b): Lightness, brightness, and brightness contrast: 2. Reflectance variation. *Perception & Psychophysics*, 54(4), 457–468. <https://doi.org/10.3758/BF03211768>
- Blakeslee, B., Reetz, D., & McCourt, M. E. (2008): Coming to terms with lightness and brightness: Effects of stimulus configuration and instructions on brightness and lightness judgments. *Journal of Vision*, 8(11), 3–3. <https://doi.org/10.1167/8.11.3>
- Blakeslee, B., & McCourt, M. E. (2003): A Multiscale Spatial Filtering Account of Brightness Phenomena. In L. Harris & M. Jenkin (Hrsg.), *Levels of Perception* (S. 47–72). Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/0-387-22673-7\\_4](https://doi.org/10.1007/0-387-22673-7_4)
- Bruno, N. (1994): Failures of lightness constancy, edge integration, and local edge enhancement. *Vision Research*, 34(17), 2205–2214. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90103-1](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90103-1)
- Gelb, A. (1932): *Die Erscheinungen Des Simultanen Kontrastes Und Der Eindruck Der Feldbeleuchtung*.
- Gilchrist, A. L. (1988): Lightness contrast and failures of constancy: A common explanation. *Perception & Psychophysics*, 43(5), 415–424. <https://doi.org/10.3758/BF03207877>

- Gilchrist, A. L. (2006): *Seeing black and white*. Oxford University Press.  
OCLC: ocm64688840.
- HRL: *High Resolution Luminance*. (n. d.). Verfügbar 9. Dezember 2023 unter <https://github.com/computational-psychology/hrl>
- Jacobsen, A., & Gilchrist, A. (1988): The ratio principle holds over a million-to-one range of illumination. *Perception & Psychophysics*, 43(1), 1–6. <https://doi.org/10.3758/BF03208966>
- Jameson, D., & Hurvich, L. M. (1961): Complexities of Perceived Brightness. *Science*, 133(3447), 174–179. <https://doi.org/10.1126/science.133.3447.174>
- Kingdom, F. A. (2011): Lightness, brightness and transparency: A quarter century of new ideas, captivating demonstrations and unrelenting controversy. *Vision Research*, 51(7), 652–673. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.09.012>
- Mach, E. (1865): *Über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut: vorgelegt in der Sitzung am 3. October 1865*. K. k. Hof- und Staatsdruckerei.
- Murray, R. F. (2021): Lightness Perception in Complex Scenes. *Annual Review of Vision Science*, 7(1), 417–436. <https://doi.org/10.1146/annurev-vision-093019-115159>
- O’Shea, R. P., & Savoy, R. L. (1995): Colour Constancy for Real and Computer-Simulated Papers.
- Patel, K. Y., Munasinghe, A. P., & Murray, R. F. (2018): Lightness matching and perceptual similarity. *Journal of Vision*, 18(5), 1. <https://doi.org/10.1167/18.5.1>
- Psignifit. (n. d.). Verfügbar 9. Dezember 2023 unter <https://github.com/wichmann-lab/python-psignifit>
- Radonjic, A., Pearce, B., Aston, S., Krieger, A., Dubin, H., Cottaris, N. P., Brainard, D. H., & Hurlbert, A. C. (2016): Illumination discrimination in real and simulated scenes. *Journal of Vision*, 16(11), 2. <https://doi.org/10.1167/16.11.2>
- Savoy, R. L., & O’Shea, R. P. (1993): Color Constancy with Reflected and Emitted Light. *Perception*, 22, 61.
- Stimupy. (n. d.). Verfügbar 9. Dezember 2023 unter <https://github.com/computational-psychology/stimupy>
- White, M. (1979): A New Effect of Pattern on Perceived Lightness. *Perception*, 8(4), 413–416. <https://doi.org/10.1068/p080413>