



Bachelorarbeit
Simultaner Helligkeitskontrast in E-Papier und
Bildschirm:
Untersuchung der Magnitude des Effekts durch Beleuchtungsänderungen.

(Vorgelegt bei erster Prüfer:)
Dr. Guillermo Aguilar

(Vorgelegt bei zweiter Prüfer:)
Prof. Dr. Guillermo Gallego

(Vorgelegt von:)
Daniel Castro Sánchez
Matrikelnummer: 413157

9. Dezember 2024

Eigenständigkeitserklärung

1. Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die den benutzten Quellen und Hilfsmitteln unverändert oder inhaltlich entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.
2. Bei dieser Arbeit wurde „ChatGPT 4o mini“ von OpenAI zur sprachliche Überprüfung und Verbesserung der Texte benutzt. Ich verantworte die Auswahl, die Übernahme und sämtliche Ergebnisse des von mir verwendeten KI-generierten Outputs vollumfänglich selbst.
3. Die Satzung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der TU Berlin vom 8. März 2017. https://www.static.tu.berlin/fileadmin/www/10000060/FSC_Promotion__Habilitation/Dokumente/Grundsäetze_gute_wissenschaftliche_Praxis_2017.pdf habe ich zur Kenntnis genommen.
4. Ich erkläre weiterhin, dass ich die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe.

Berlin den 9. Dezember 2024

Daniel Castro Sánchez

Unterschrift: _____

Zusammenfassung

Diese Studie untersucht die Magnitude des simultanen Helligkeitskontrasteffekts (SBC) auf E-Papier und Bildschirmen, mit dem Fokus darauf, wie unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen die Kontrastwahrnehmung beeinflussen. Ziel der Forschung war es, zu klären, ob E-Papier sich ähnlich wie traditionelles Papier verhält, insbesondere unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen wie „homogener“, „vergrößerter“ und „gelber“ Beleuchtung. Die Hypothese lautete, dass E-Papier unter gelber Beleuchtung vergleichbare Ergebnisse wie Bildschirme zeigen würde, jedoch unter homogener Beleuchtung schwächere Effekte auftreten sollten, wobei E-Papier in diesem Fall schlechter abschneiden würde als Bildschirme.

Das Experiment verwendete SBC-Reizbilder, um die Kontrastunterschiede zwischen einem Target und einer Probe zu messen, die sowohl auf E-Papier als auch auf Bildschirmen dargestellt wurden. Es wurden zwei Hauptbeleuchtungsbedingungen – hohe und niedrige Leuchtdichte – getestet. Die Studie zeigte, dass E-Papier unter homogener Beleuchtung die größte Variabilität in der Kontrastwahrnehmung aufwies, mit den schwächsten Effekten, insbesondere bei niedriger Leuchtdichte. Im Gegensatz dazu zeigte der Bildschirm unter allen Bedingungen stabilere und deutlichere Kontrastunterschiede. Die gelbe Beleuchtung verbesserte jedoch den Kontrasteffekt auf E-Papier erheblich, sodass die Effekte unter dieser Beleuchtung die Ergebnisse unter homogener Beleuchtung übertrafen.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Beleuchtung eine entscheidende Rolle bei der Leistung von E-Papier spielt, wobei gelbe Beleuchtung die Kontrastwahrnehmung optimiert und zu vergleichbaren oder überlegenen Effekten im Vergleich zu Bildschirmen führt. Unter homogener Beleuchtung, insbesondere bei niedriger Leuchtdichte, zeigte E-Papier jedoch eine schlechtere Kontrastdifferenzierung, wodurch Bildschirme die zuverlässigere Option für Anwendungen mit präzisen Kontrastanforderungen bleiben. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Anpassung der Beleuchtungsbedingungen, um die Leistung von E-Papier-Displays zu optimieren. Ob die Unterschiede zwischen alle Bedingungen beider Anzeigen jedoch statistisch relevant sind, konnte jedoch nicht komplett ausgeschlossen werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	9
1.1 Helligkeit / Helligkeitskontrast	9
1.2 Relevante Forschungen	9
1.3 Problemstellung/Fragestellung:	16
1.4 Hypothese	16
2 Methode	17
2.1 Reizbilder	17
2.2 Anzeigeformen:	19
2.2.1 E-Papier	19
2.2.2 Bildschirm	20
2.3 Kalibrierung der Anzeigen und Mapping der Leuchtdichte	21
2.4 Durchlauf	24
2.5 Experiment	27
3 Ergebnisse	28
3.1 Psychometrische Funktion	28
3.1.1 Analyse der psychometrische Funktionen	30
3.2 Magnitude des Effekts	33
3.3 Berechnung der Randdichte und neuen Konfidenzintervall	36
3.4 Ergebnisse mit Konfidenzintervall	37
4 Diskussion	44
4.1 Bewertung der Fragestellung und Hypothese	44
4.2 Beschränkungen	45
4.3 Ausblick und Offene Fragen	46
5 Literatur	48
6 Abbildungsverzeichnis	49
7 Tabellenverzeichnis	52
8 Anhang	53
8.1 Grafiken des Vergleich der Anzeige- und Beleuchtungsformen anhand der psychometrischen Funktionen	53
8.1.1 bei höherem Leuchtdichtenbereich	53
8.1.2 bei reduziertem Leuchtdichtenbereich	61
8.2 Grafiken zur Zusammenfassung der Ergebnisse	69

1 Einleitung

1.1 Helligkeit / Helligkeitskontrast

Das Sehen ist einer der Sinne, die unser tägliches Leben am meisten prägen. Obwohl wir es als selbstverständlich betrachten und es uns so vertraut erscheint, verstehen wir auch heute noch viele der zugrunde liegenden Prozesse nicht vollständig. Eines der bekanntesten Phänomene, die durch weit verbreitete visuelle Illusionen hervorgehoben werden, ist der Prozess, wie wir Helligkeitskontrast zwischen Objekten wahrnehmen. Helligkeit kann als eine wahrgenommene Schätzung des Reflexionsgrads beschrieben werden, das heißt, des Anteils des einfallenden Lichts, der von einer Oberfläche reflektiert wird. Selbst wenn wir zwei identische Objekte in Größe, Farbe und Form betrachten, können sie unter bestimmten Umständen unterschiedlich erscheinen. Ein Beispiel dafür wäre das Phänomen der simultanen Helligkeitskontrasts ([Abb. 1](#)). Um dies zu untersuchen, wurden Forschungen zur Helligkeitskontrastwahrnehmung mit Papier und Leuchtmitteln durchgeführt (GIBBS und LAWSON, [1974](#); GILCHRIST, [1988](#); GILCHRIST et al., [1983](#); WHITE, [1981](#)).

Ende des 20. Jahrhunderts, mit der Einführung von Bildschirmen, wurde Papier durch Computersimulationen ersetzt, um solche Prozesse zu untersuchen. Computergenerierte Bilder ermöglichen eine präzisere und einfachere Kontrolle über die Reize, wiesen jedoch im Gegensatz zu traditionellem Papier die Eigenschaft auf, dass die Oberfläche des Bildschirms Licht ausstrahlte. Dies schuf ein künstliches Szenario, in dem ein Bereich mit hoher Leuchtdichtebereich betrachtet wurde, der ansonsten außerhalb des Bildschirms dunkel war. Viele Forschungen simulierten auf dem Bildschirm frühere Experimente, die mit Papier und Leuchtmitteln gemacht wurden, unter vergleichbaren Bedingungen. Die Ergebnisse dieser neuen Studien zeigten jedoch doppelt so starke Helligkeitskontrasteffekte wie die ihrer Vorgänger ([Bruno, 1994](#)).



Abbildung 1: Simultanen Helligkeitskontrast. Das Quadrat im schwarzen Hintergrund erscheint heller als das im weißen, obwohl beide Figuren die gleiche Graustufe haben

1.2 Relevante Forschungen

In einer früheren Bachelorarbeit an der TU Berlin ([Park, 2024](#)) wurde der Vergleich zwischen Bildschirm und elektronischem Papier (E-Papier) als Anzeigeformen mit Fokus auf den Helligkeitskontrast untersucht. Als Reizbilder wurden ein simultaner Helligkeitskontrast, abgekürzt als SBC ([Abb. 2a](#)), und eine vereinfachte Version des White-Effekts, abgekürzt als White ([Abb. 2a](#)), auf dem Bildschirm und dem E-Papier simuliert. Bei den

Reizbildern war eines der grauen Quadrate/Rechtecke das Target, das andere die Probe. Target und Probe wurden so positioniert, dass sich, wenn das Target auf weißem Hintergrund platziert war, die Probe auf schwarzem Hintergrund befand, und umgekehrt. Das Target hatte einen festen Reflexionsgrad von 0.5, während die Probe abhängig vom Hintergrund variierte. Auf dem schwarzen Hintergrund lag der Reflexionsgrad der Probe in einem Intervall von 0.1 bis 0.4, mit einer Schrittweite von 0.06. Auf dem weißen Hintergrund lag das Intervall zwischen 0.6 und 0.9. Das Experiment mit dem E-Papier wurde so beleuchtet, dass sowohl das Reizbild als auch die Umgebung sichtbar waren, was zu einer nahezu homogenen Beleuchtung führte([Abb. 2b](#)). Beim Bildschirm hingegen war die einzige Lichtquelle der Bildschirm selbst, wodurch die gesamte Umgebung dunkel war([Abb. 2c](#)).

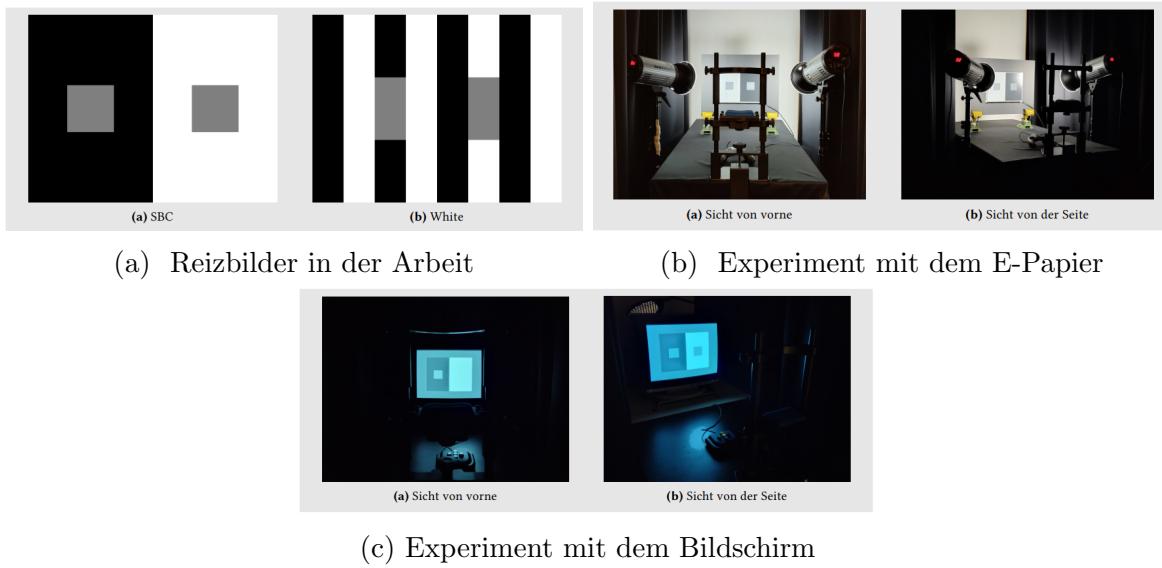
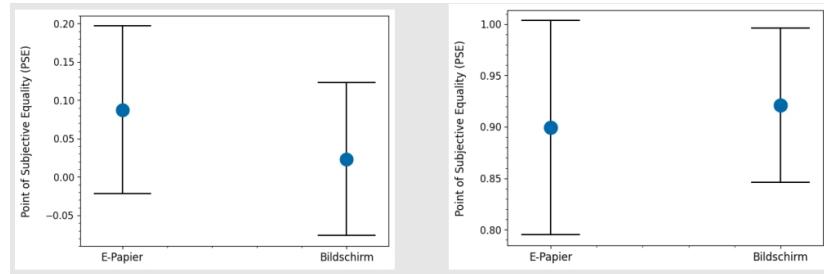


Abbildung 2: Abbildungen aus der Arbeit ([Park, 2024](#)).

Um die Magnitude des Helligkeitskontrasteffekts zu berechnen, wurde zunächst für jeden Teilnehmer die psychometrische Funktion berechnet und der PSE (point of subjective equality/Punkt der subjektiven Gleichheit) bestimmt([Abb. 4](#)). Der PSE ist der Punkt, an dem der Beobachter das Target und die Probe nicht mehr voneinander unterscheiden kann und eins von beidem mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% wählt. Somit nimmt der Beobachter die Reflexionsgrade der Probe, die links von dem PSE sind, dunkler als das Target, während die Punkte rechts als heller wahrgenommen werden. Anschließend wurde die Differenz zwischen dem Target und dem PSE für das E-Papier und den Bildschirm berechnet, um die Magnitude des Effekts zu ermitteln([Abb. 3a](#)). Erstmals schien der Effekt auf dem Bildschirm größer zu sein als bei dem E-Papier, da aber der PSE ein subjektiver Punkt ist, wurde der 95%ige Konfidenzintervall zwischen beiden Anzeigeformen für jeden Beobachter berechnet([Abb. 3b](#)). Entgegen den Erwartungen ergaben beide Anzeigeformen keinen wesentlichen Unterschied in Bezug auf die Größe des wahrgenommenen Helligkeitskontrasteffekts, da es für alle Konfidenzintervalle zwischen beiden Anzeigeformen eine Schnittmenge gab.

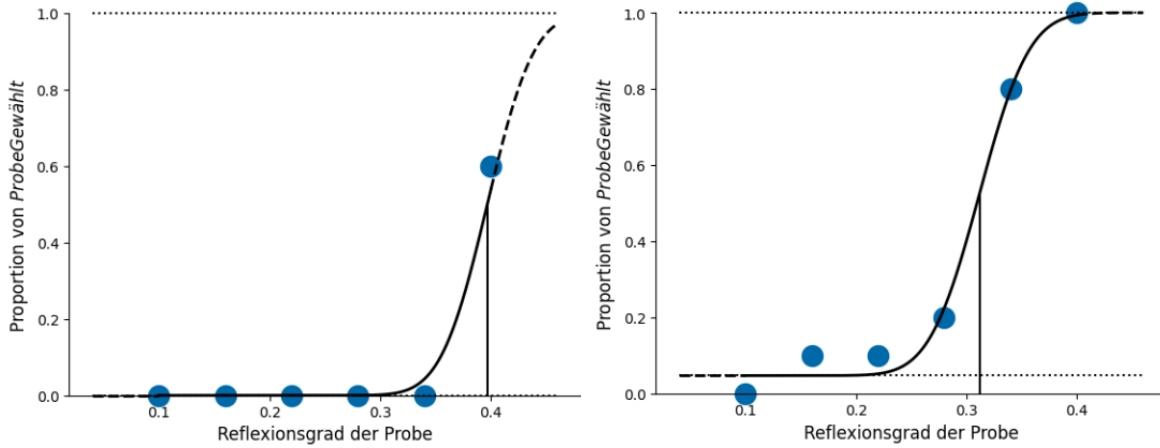
Reizart	SBC					
Positionierung	Target auf Weiß			Target auf Schwarz		
	Probe auf Schwarz			Probe auf Weiß		
Anzeigeform	E-Papier	Bildschirm	Differenz	E-Papier	Bildschirm	Differenz
Proband 1	0.390	0.468	-20.00 %	0.384	0.420	-9.38 %
Proband 2	0.293	0.316	-7.85 %	0.378	0.420	-11.11 %
Proband 3	0.404	0.454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

(a) SBC: Die Magnitude des Effektes auf zwei Anzeigeformen und Differenz

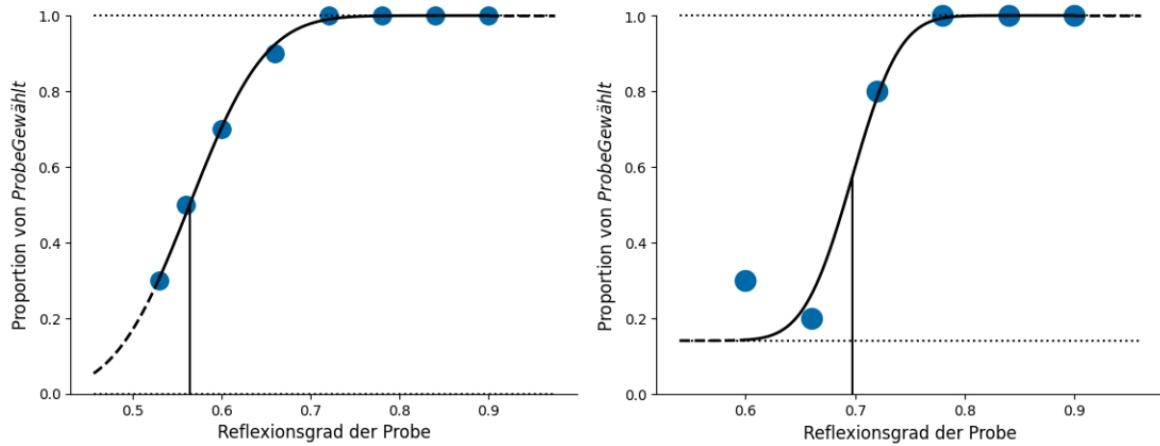


(b) Vergleich des 95% Konfidenzintervalls eines Probanden zwischen zwei Anzeigenformen

Abbildung 3: Abbildung aus der Arbeit (Park, 2024) Tab. 5.7 und Abb. 6.4



(a) E-Papier, Target in Weiß, Probe in Schwarz (b) Bildschirm, Target in Weiß, Probe in Schwarz



(c) E-Papier, Target in Schwarz, Probe in Weiß (d) Bildschirm, Target in Schwarz, Probe in Weiß

Abbildung 4: Abbildung aus der Arbeit (Park, 2024) Abb. 6.1.

Agostini und Bruno (1996) verglichen Bildschirme mit Papier und Leuchtmitteln, um die Ursache der zu Beginn genannten Differenz beider Anzeigeformen in der Helligkeitskontrastwahrnehmung zu ermitteln. Für alle Experimente in dieser Arbeit wurde dasselbe Reizbild verwendet (Abb. 5). Die Beobachter mussten immer die Helligkeit des kleinen Quadrats auf der linken Seite mit einem der Rechtecke auf der rechten Seite abstimmen. Im ersten Experiment wurde ein Bildschirm aus Papier gebaut, der so beleuchtet wurde, dass der Rand des Lichtstrahls mit der Außenkante der Anzeige übereinstimmte. Dies wurde durchgeführt, um ähnliche Bedingungen wie bei herkömmlichen Bildschirmen zu schaffen. Diese Beleuchtungsform wurde, in Anlehnung an den Gelb-Effekt, Gelb-Beleuchtung (Abb. 7a) genannt. Die Reizbilder wurden sowohl auf dem Bildschirm als auch auf der Papieranzeige gezeigt, um erstmals einen allgemeinen Vergleich zwischen beiden Anzeigeformen zu machen.

Aus diesem Experiment ergaben sich die folgenden Erkenntnisse:

1. Wie bereits erwähnt, ist der Helligkeitskontrasteffekt auf traditionellem Papier geringer als auf Bildschirmen. Durch den Bau und die Beleuchtung einer solchen Papieranzeige kann die Größe des Kontrasteffekts auf eine Weise erhöht werden, die der auf einem normalen Bildschirm sehr ähnlich ist ([Abb. 6](#)).
2. Die Größe des wahrgenommenen Effekts hängt davon ab, dass das Reizbild mit hoher Helligkeit innerhalb eines schwächeren Kontexts betrachtet wird.

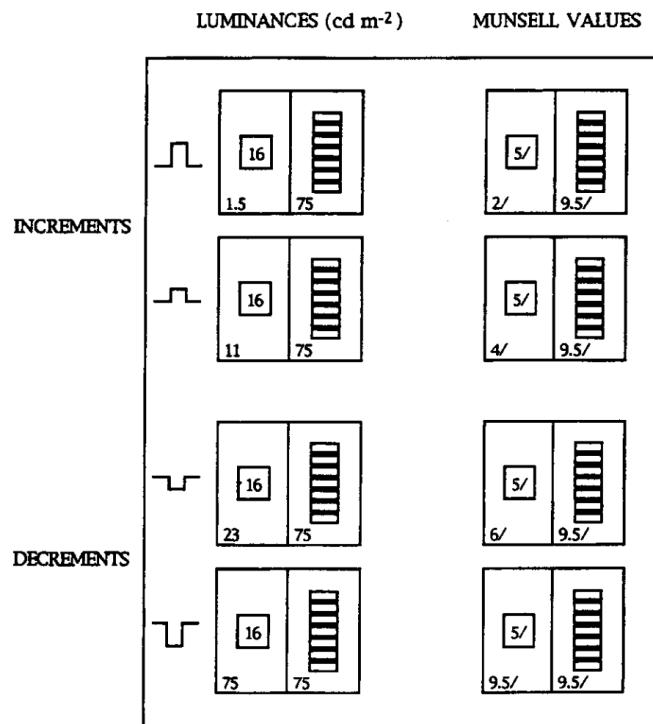
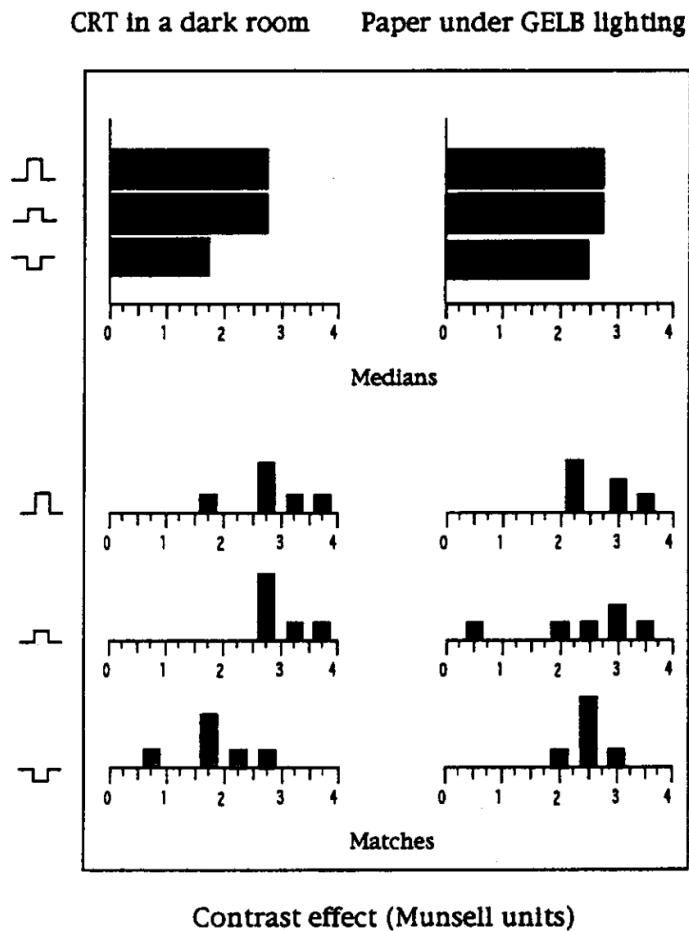


Abbildung 5: Abbildung aus der Arbeit (Agostini und Bruno, [1996](#)). Experiment 1: Reizbild für die Experimente. Die Rechtecke auf der rechten Seite wurden so aufgeteilt, dass sie alle Graustufen der Munsell-Skala zwischen Schwarz und Weiß repräsentieren.



Contrast effect (Munsell units)

Abbildung 6: Abbildung aus der Arbeit (Agostini und Bruno, 1996). Ergebnisse des ersten Experiments: Auf der linken Seite stehen die Ergebnisse, die auf dem Bildschirm gemessen wurden, und auf der rechten Seite die des Papier-Anzeige.

Für das zweite Experiment wurde nur die Papieranzeige benutzt. Diese wurde jedoch unter drei verschiedenen Bedingungen beleuchtet:

1. Vergrößerte Bedingung (Enlarged): Ein kreisförmiger Lichtstrahl an der Wand mit einem Durchmesser von 30% des Blickwinkels, der um die Anzeige zentriert war. (Abb. 7b).
2. Homogene Bedingung (Homogeneous): Der gesamte Raum wurde nahezu homogen beleuchtet. (Abb. 7c).
3. Tageslichtbedingung (Daylight): Die Anzeige wurde an einem mäßig sonnigen Tag im Freien aufgestellt.

Aus dem ersten Experiment ging hervor, dass der Kontrastseffekt größer wird, wenn man ein Reizbild betrachtet, das beleuchtet wird und in einer dunklen Umgebung steht. Mit den Ergebnissen des zweiten Experiments (Abb. 8) zeigt sich, dass je größer die Umgebung in denselben Beleuchtungsrahmen des Zielbildes einbezogen wird, desto kleiner der Kontrasteffekt ist. Die Ergebnisse der Gelb-Beleuchtung sind daher größer als

die der homogenen Beleuchtung. Somit scheint es eine Korrelation zwischen dem Kontrasteffekt und der Beleuchtungsfläche zu bestehen.

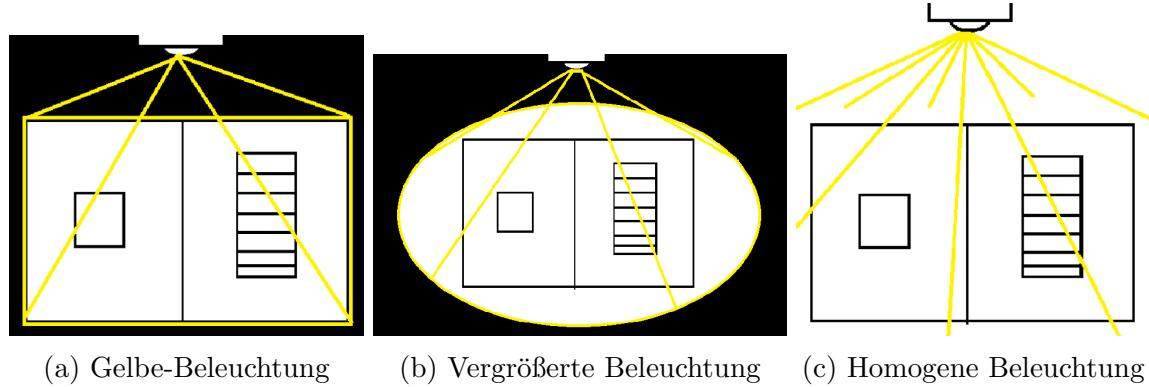


Abbildung 7: Von mir erstellt zur Veranschaulichung der Beleuchtungsformen in Experiment 1 und 2 von (Agostini und Bruno, 1996)

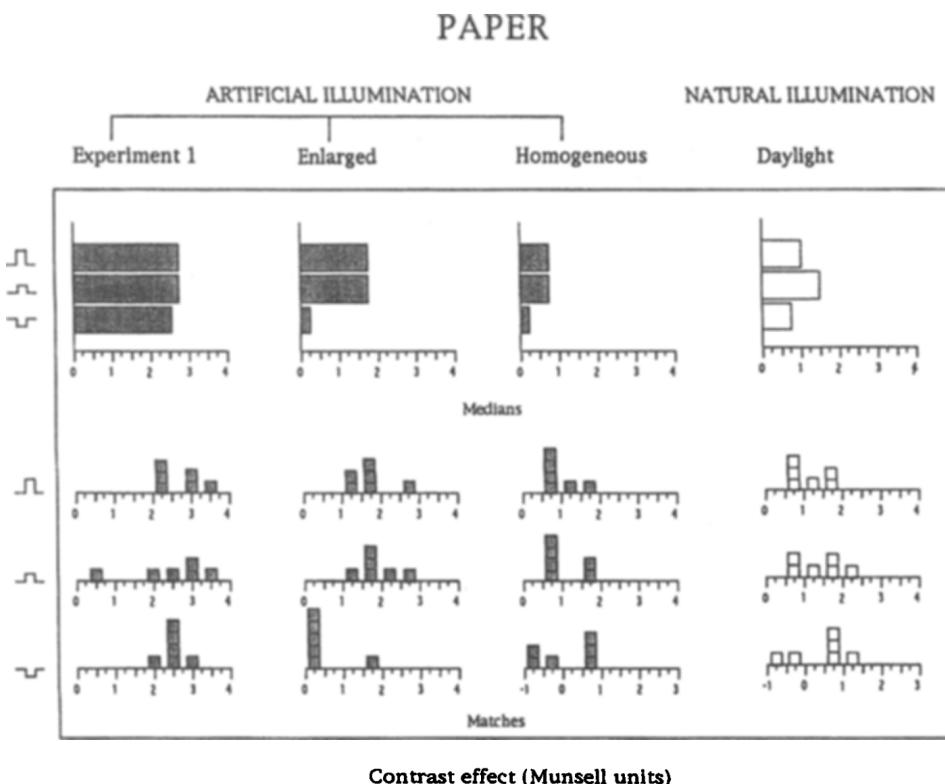


Abbildung 8: Abbildung aus der Arbeit(Agostini und Bruno, 1996). Ergebnisse aus dem zweiten Experiment

1.3 Problemstellung/Fragestellung:

Elektrisches sowie traditionelles Papier sind reflexionsbasierte Darstellungen. Beide Medien benötigen Umgebungslicht, um sichtbar zu sein. Während herkömmliches Papier das Umgebungslicht gleichmäßig streut, basiert E-Papier auf mikroskopisch kleinen Pigmentpartikeln, die die Darstellung von Text und Bildern ermöglichen. Aufgrund dieser Funktionsweisen kann man annehmen, dass Experimente zur Untersuchung des Helligkeitskontrasts ähnliche, wenn nicht identische Ergebnisse bei beiden Anzeigeformen liefern. Hier entsteht eine Diskrepanz zwischen den Schlussfolgerungen der beiden genannten Studien. Laut (Agostini und Bruno, 1996) ist die Größe des Effekts auf Bildschirmen doppelt so stark wie auf Papier und nur unter bestimmten Umständen gleich. Bei (Park, 2024) hingegen sind E-Papier und Bildschirme äquivalent. Da das E-Papier bei Park homogen beleuchtet wurde, widerspricht dies der Aussage von Agostini und Bruno unter der Annahme der Äquivalenz beider Papieranzeigen. E-Papier sollte somit nur ähnliche Ergebnisse wie Bildschirme liefern, wenn es „Gelb“ beleuchtet wird.

1.4 Hypothese

Diese Arbeit widmet sich der Untersuchung dieser Diskrepanz unter der Annahme, dass E-Papier sich wie traditionelles Papier hinsichtlich des wahrgenommenen Helligkeitseffekts verhält. Somit sollten bei Gelb-Beleuchtung auf E-Papier vergleichbare Ergebnisse wie auf dem Bildschirm erzielt werden. Bei homogener Beleuchtung hingegen sollten geringere Ergebnisse als bei Bildschirmen erreicht werden.

2 Methode

Um meine Hypothese zu überprüfen, simuliere ich die Beleuchtungsbedingungen der ersten und zweiten Experimente aus Agostini und Bruno, 1996, jedoch unter Verwendung derselben Anzeigeformen wie im Experiment von Park, 2024. Da das Experiment von Park die Grundlage meiner Untersuchung bildet, werden viele der Einstellungen aus dieser Arbeit übernommen.

Da in der Arbeit von Park die Magnitude des Effekts beim simultanen Helligkeitskontrast stärker ausgeprägt war als bei der vereinfachten Version des White-Effekts, konzentriert sich diese Arbeit bei den Experimenten ausschließlich auf SBC. Die Leuchtdichte, die einen der größten Unterschiede zwischen den beiden Arbeiten darstellt, wird in den Experimenten als Kontrollbedingung angepasst. Daher wurden die Experimente sowohl unter hoher als auch unter niedriger Leuchtdichte durchgeführt.

Im kommenden Abschnitt wird zunächst beschrieben, wie das Reizbild eingestellt wurde und welche Probleme dabei auftraten. Entsprechend wird auch für die beiden Anzeigeformen, die im Experiment genutzt wurden, erläutert. Danach wird der Ablauf für die Beobachter dargestellt und welche Anweisungen diese erhalten haben. Letztendlich gehen wir auf das Experiment ein.

2.1 Reizbilder

Wie vorhin beschrieben, wird für die Experimente nur der simultane Helligkeitskontrast (SBC) als Reizbild verwendet. Die vereinfachte Version von White wird für die Experimente nicht berücksichtigt, da der Effekt teilweise doppelt oder dreimal kleiner war als bei SBC (Abb. 9) und somit für die Vertiefung des Experiments als irrelevant angesehen wird.

Reizart	SBC						
	Target auf Weiß			Target auf Schwarz			
Positionierung	Probe auf Schwarz			Probe auf Weiß			
	Anzeigeform	E-Papier	Bildschirm	Differenz	E-Papier	Bildschirm	Differenz
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 %

(a) SBC: Die Magnitude des Effektes auf zwei Anzeigeformen und Differenz

Reizart	White						
	Target auf Weiß			Target auf Schwarz			
Positionierung	Probe auf Schwarz			Probe auf Weiß			
	Anzeigeform	E-Papier	Bildschirm	Differenz	E-Papier	Bildschirm	Differenz
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 %

(b) White: Die Magnitude des Effektes auf zwei Anzeigeformen und Differenz

Abbildung 9: Abbildung aus der Arbeit (Park, 2024) Tab. 5.7 und 5.8.

Alle Reizbilder der Experimente erfüllen folgende Eigenschaften:

1. Der Reflexionsgrad betrug entweder 0 für die schwarze Hintergrundfarbe oder 1 für die weiße. Der Hintergrund auf der linken Seite war stets schwarz, während der rechte Hintergrund immer weiß war. Dadurch befand sich das linke Quadrat immer auf einem dunklen Hintergrund und das rechte Quadrat auf einem hellen.
2. Eines der beiden Quadrate war immer das Target-Quadrat (T) und das andere die Probe (P). Das Target hatte einen festen Reflexionsgrad von 0.5, unabhängig davon, auf welchem Hintergrund es sich befand.

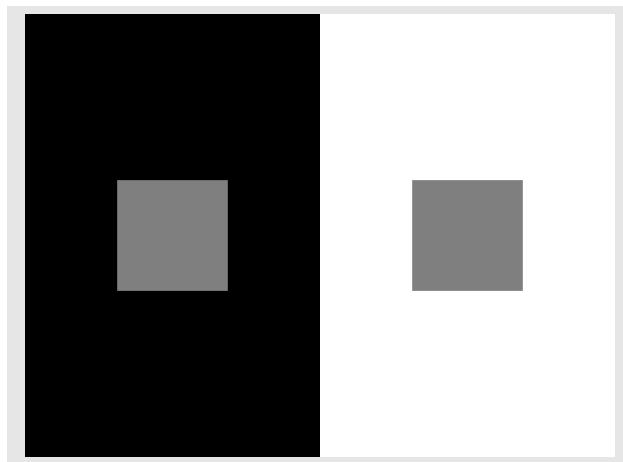


Abbildung 10: Grundlegender simultaner Helligkeitskontrast. Beide Quadrate haben einen Reflexionsgrad von 0.5.

Diese Konfiguration bewirkte, dass das graue Quadrat auf der linken Seite heller wirkte. Abbildung [Abb. 10](#) zeigt den Grundreiz mit den beschriebenen Einstellungen. Der Reflexionsgrad der Vergleichsprobe hing von der jeweiligen Hintergrundfarbe ab. Es gab zwei Konfigurationsmöglichkeiten:

1. Im ersten Fall befand sich das Target vor einem weißen Hintergrund, während die Vergleichsprobe auf einem schwarzen Hintergrund platziert war.
2. Im zweiten Fall war es umgekehrt, das Target lag auf schwarzem Hintergrund und die Vergleichsprobe auf weißem.

Für den ersten Fall wurde der Reflexionsgrad der Probe in einem Bereich von 0.1 bis 0.4 mit einem Abstand von 0.06 gewählt. Die konkreten Werte waren $\{0.1, 0.16, 0.22, 0.28, 0.34, 0.4\}$. Im zweiten Fall lag der Reflexionsgrad der Vergleichsprobe zwischen 0.6 und 0.9, ebenfalls in Schritten von 0.06. Die Werte waren $\{0.6, 0.66, 0.72, 0.78, 0.84, 0.9\}$. Insgesamt ergaben sich somit 12 unterschiedliche Reizbilder, die jeweils zehnmal abgespielt wurden, womit der gesamte Block 120 Bilder war. Die Werte wurden so ausgewählt, dass nach der Erstellung der psychometrischen Funktion bestimmte Punkte links vom PSE und andere rechts davon liegen.

Die Reize wurden mithilfe des Python-Pakets „Stimupy“ erstellt. Dafür wurden die Größe und die Reflexionsgrade der Reize festgelegt. Die Größe der Reize wurde mit

dem Sehwinkel bestimmt, der auf der festen Auflösung des E-Papiers und der Pixels-Per-Degree (PPD) des Bildschirms beruhte. Diese grundlegenden Einstellungen wurden aus der Arbeit von (Park, 2024) übernommen. Beide grauen Quadrate des Reizbildes hatten Maße von 5x5 cm und einen Sehwinkel von $1.46 \times 1.46^\circ$.

2.2 Anzeigeformen:

Die Experimente wurden in einen Visuellen-Wahrnehmungs-Labor der Technischen Universität durchgeführt. Es wurden dieselben Anzeigeformen wie bei (Park, 2024) verwendet, da beide Experimente in der gleichen Einrichtung stattfanden.

2.2.1 E-Papier

Die Anzeige wurde von Visionect hergestellt und hat eine Auflösung von 1600×1200 px, eine Größe von 27×20.2 cm und eine Farbtiefe von 2^4 Bits. Das E-Papier wurde mittig auf einer schwarzen Tafel mit den Maßen 52×42 cm befestigt, die ursprünglich senkrecht auf dem Schreibtisch platziert war. Somit ergab das Gesamtbild einen Sehwinkel von $14.869 \times 12.095^\circ$, während der Sehwinkel des E-Papiers $7.843 \times 5.884^\circ$ betrug. Die Probanden saßen an dem Tisch mit einem Abstand von 98 cm zum E-Papier. Um die Beleuchtungsfläche, wie es ausführlicher im Experiment beschrieben wird, besser kontrollieren zu können, wurde ein Beamer von Mitsubishi Electric, Model XL550U, als einzige Lichtquelle verwendet. Dieser befand sich auf einem Stativ in einer Höhe von etwa 163 cm. Das Stativ war mit einer Neigung von 20° nach unten in Richtung E-Papier ausgerichtet und befand sich etwa 30 cm direkt hinter den Probanden. Unter diesen Bedingungen reflektierte das Licht des Beamers jedoch zu stark auf der Oberfläche des E-Papiers, was das Erkennen der Reize erschwerte. Da das Stativ nicht höher gestellt werden konnte, wurde die schwarze Tafel, auf der sich das E-Papier befand, mit einem Winkel von weniger als 5° gegen das Licht geneigt. Die Abbildung Abb. 11a zeigt die aus der Beschreibung resultierende Einrichtung während die Abbildung Abb. 11b die Sicht eines Probanden zeigt.

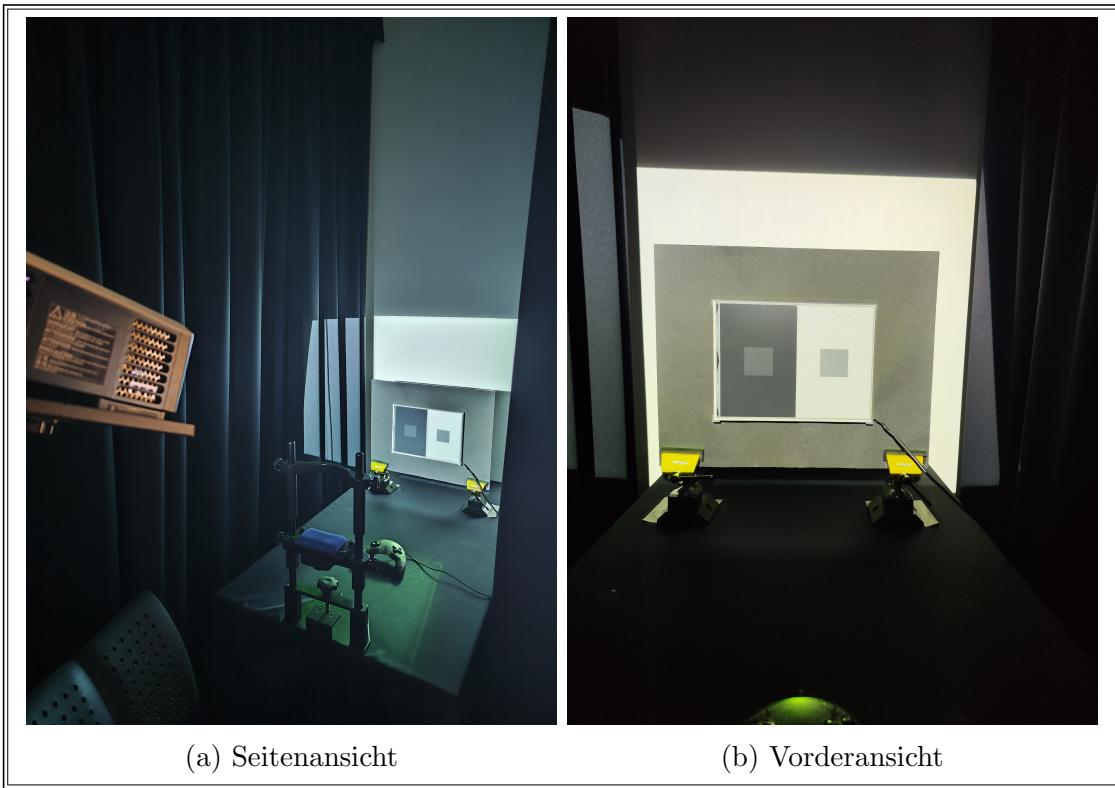


Abbildung 11: Einrichtung für die Versuche mit dem E-Papier als Anzeigeform

2.2.2 Bildschirm

Für die Computersimulation wurde ein Graustufen-CRT-Bildschirm von Siemens, Modell SMM 21106 LS, verwendet. Der Bildschirm, der speziell für solche Simulationen entwickelt wurde, war über ein DataPixed-USB-Peripheriegerät von VPixx mit dem Computer verbunden, und zur Anpassung der Leuchtdichte wurde das Python-Paket HRL eingesetzt. Die Anzeige hatte eine Auflösung von 1024×768 px, Abmessungen von 400×300 mm und eine Farbtiefe von 2^{16} Bits. Die maximale darstellbare Leuchtdichte auf dem Bildschirm betrug 500 cd/m^2 . Der Bildschirm war mittig auf einem Tisch platziert, in einem Abstand von 98 cm zum Probanden. Dadurch fiel das Reizbild unter einen Sehwinkel von $63.895 \times 56.842^\circ$. Da der Bildschirm etwas größer war als das E-Papier, wurde die Größe der Reizbilder entsprechend angepasst, sodass die Reize in beiden Anzeigeformen bei gleicher Größe und unter demselben Sehwinkel von $7.843 \times 5.884^\circ$ dargestellt wurden. Im Gegensatz zum E-Papier war bei dem Bildschirm Experiment, der Apparat selbst die einzige Lichtquelle ansonsten war der Raum relativ dunkel. Die Abbildung Abb. 11a zeigt die aus der Beschreibung resultierende Einrichtung während die Abbildung Abb. 11b die Sicht eines Probanden zeigt.

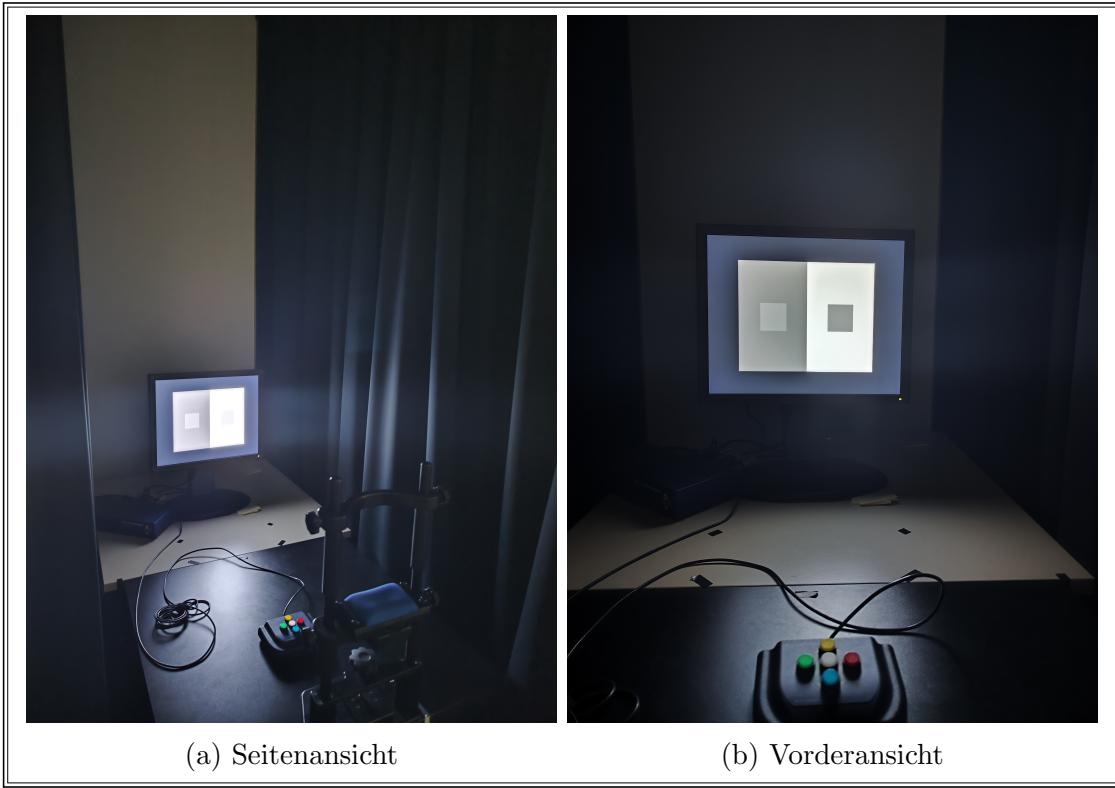


Abbildung 12: Einrichtung für die Versuche mit dem Bildschirm als Anzeigeform

2.3 Kalibrierung der Anzeigen und Mapping der Leuchtdichte

Nachdem alle Reizbilder, abhängig vom Reflexionsgrad, für das E-Papier generiert worden waren, wurde die Leuchtdichte für jedes Reizbild mithilfe des Photometers LS-100 von Konica Minolta gemessen. Die Messung erfolgte aus einem Abstand von etwa 1.5 m zum Reizbild. Folgende fünf Elemente wurden gemessen: der Hintergrund außerhalb des Reizes (B_g), der schwarze (B_{g_b}) und weiße (B_{g_w}) Hintergrund innerhalb des Reizes sowie das Target-Quadrat auf schwarzem (T_b) und auf weißem (T_w) Hintergrund (siehe [Tabelle 1](#)). Die Messungen wurden wiederholt und die Einrichtung angepasst, bis beide grauen Quadrate ähnliche Werte aufwiesen. Wie bereits erwähnt, stellte der Beamer ein Problem bei der Messung dar, da sich das Licht auf der Oberfläche des E-Papiers reflektierte. Dies erschwerte das Erkennen der Reize und führte zu einer asymmetrischen Verteilung der Leuchtdichte. Um diese Lichtreflexion zu vermeiden, wurde das E-Papier um weniger als 5° gegen das Licht geneigt. Die Reflexion war dadurch nicht mehr sichtbar, dennoch bestand ein Unterschied zwischen der oberen und unteren Fläche der Anzeige, sodass der Durchschnitt aus beiden Messungen genommen wurde. Dies ist auch in [Tabelle 1](#) zu sehen. Nach dieser Konfiguration wurde für alle Reflexionsgrade des Probe-Quadrats die Leuchtdichte gemessen. Die Zuordnung zwischen Reflexionsgrad und entsprechender Leuchtdichte ist in der [Tabelle 2](#) dargestellt.

Für die Kalibrierung des Bildschirms war es entscheidend, die Anzeigeform unter vergleichbaren Bedingungen wie beim E-Papier darzustellen. Daher wurden die Reizgrößen angepasst, und alle auf dem E-Papier gemessenen Leuchtdichten wurden in ein Python-Skript eingefügt, das die entsprechenden Reflexionsgrade für den Bildschirm mithilfe der "Look-Up-Tabelle (LUT)" berechnete. [Abb. 13](#) zeigt die Visualisierung der

LUT, die zur Parameterschätzung verwendet wurde. Anschließend wurden, wie zuvor beim E-Papier, die Leuchtdichten in den Teilstücken gemessen. Schließlich wurde überprüft, ob die Werte der beiden Anzeigeformen übereinstimmten. Ähnlich wie beim E-Papier zeigte der Bildschirm ebenfalls eine Leuchtdichte-Differenz zwischen den oberen und unteren Teilen der Oberfläche. Um dies zu kompensieren, wurde auch hier der Durchschnitt berechnet ([Tabelle 1](#)). Im Vergleich ergab sich eine Differenz von etwa 4% zwischen den beiden Anzeigen hinsichtlich der Leuchtdichte. Interessanterweise zeigte das E-Papier bei geringem Reflexionsgrad eine niedrigere Leuchtdichte als der Bildschirm, während es bei hohem Grad umgekehrt war. In der [Tabelle 2](#) ist das Mapping für Reflexionsgrad und Leuchtdichte, der beiden Anzeigeformen zu sehen.

Anzeigeform	Bildschirm			E-Papier			
	Gemessene Stelle	Oben	Unten	Durchschnitt	Oben	Unten	Durchschnitt
Bg		0.9	1.23	1.065	0.588	0.566	0.577
Bg_b		35.12	37.20	36.16	35.45	27.16	31.305
Bg_w		251	269	260	295.9	260.2	278.05
T_b		-	-	94.74	-	-	94.92
T_w		-	-	95.93	-	-	96.12

Tabelle 1: Leuchtdichte Messungen in cd/m^2

		Anzeigeform	
Positionierung		Reflexionsgrad der Probe	E-Papier
Target auf Weiß, Probe auf Schwarz	0.1	39.19	37.4
	0.16	49.91	48.09
	0.22	56.93	54.96
	0.28	70.37	68.19
	0.34	78.90	76.7
	0.4	86.27	84.19
Target auf Schwarz, Probe auf Weiß	0.6	126.3	130.08
	0.66	147.8	152.3
	0.72	169.5	175
	0.78	187.4	193.6
	0.84	222.8	229.9
	0.9	243.7	251.8

Tabelle 2: Mapping des Reflexionsgrads und Leuchtdichte von der Probereize in cd/m^2

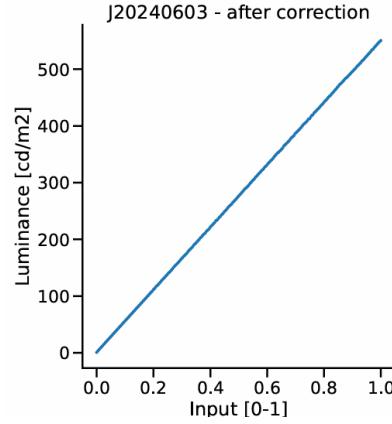


Abbildung 13: LUT des Bildschirms vom 26.08.24. Es stammt aus dem Exemplar von HRL.

Wie zuvor beschrieben, gab es einen erheblichen Unterschied in den Leuchtdichten zwischen den Experimenten von (Agostini und Bruno, 1996) und (Park, 2024). Wie in Abb. 14 zu sehen ist, lag die höchste Leuchtdichte bei (Agostini und Bruno, 1996) bei 75 cd/m^2 , während sie bei (Park, 2024) $269,04 \text{ cd/m}^2$ betrug, also fast viermal so hoch. Um zu überprüfen, ob dieser Unterschied in der Leuchtdichte eine der Ursachen für die Diskrepanz in den Ergebnissen beider Arbeiten darstellt, wird im Experiment die Leuchtdichte ebenfalls angepasst. Damit gibt es zwei Leuchtdichtestärken: eine hohe, wie bei (Park, 2024), und eine niedrige, um die Bedingungen von (Agostini und Bruno, 1996) zu simulieren. Die Anpassung und der Vergleich der Reize mit den neuen Leuchtdichten erfolgten analog zur Methode bei der hohen Leuchtdichte. In Tabelle 3 und Tabelle 4 sind diese niedrigeren Werte dargestellt.

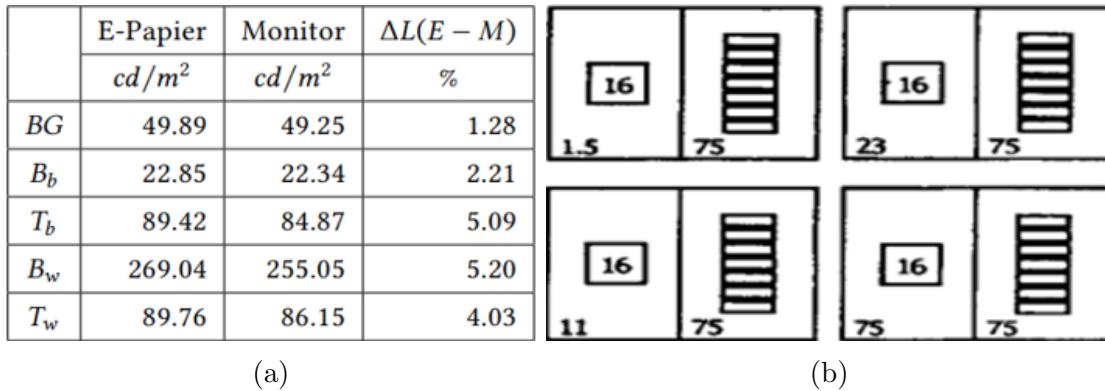


Abbildung 14: (a) Gemessene Leuchtdichte aus (Park, 2024) Tabelle 5.1 (b) Gemessene Leuchtdichte aus (Agostini und Bruno, 1996) Experiment 1

Anzeigeform	Bildschirm			E-Papier		
Gemessene Stelle	Oben	Unten	Durchschnitt	Oben	Unten	Durchschnitt
Bg	0.78	0.9	0.84	0.251	0.196	0.224
Bg_b	6.66	7	6.83	8.576	5.26	6.918
Bg_w	48.11	53.04	50.58	56.64	51.16	53.9
T_b	-	-	18.48	-	-	18.62
T_w	-	-	19.32	-	-	19.22

Tabelle 3: Leuchtdichte Messungen in cd/m^2

		Anzeigeform	
Positionierung		Reflexionsgrad der Probe	E-Papier
Target auf Weiß, Probe auf Schwarz	0.1	7.89	7.792
	0.16	9.8	9.492
	0.22	11.26	11.04
	0.28	13.78	13.44
	0.34	15.86	15.52
	0.4	17.19	16.8
Target auf Schwarz, Probe auf Weiß	0.6	24.65	25.86
	0.66	28.86	30.26
	0.72	33.16	34.58
	0.78	36.15	37.75
	0.84	43.47	45.33
	0.9	47.43	49.45

Tabelle 4: Mapping des Reflexionsgrads und Leuchtdichte von der Probe-Quadrat in cd/m^2

2.4 Durchlauf

Das Experiment war in 8 Blöcke unterteilt, die jeweils paarweise durchgeführt wurden. Zwei der acht Blöcke wurden auf dem Bildschirm abgespielt, die restlichen sechs auf dem E-Papier. Nach jedem Block erfolgte eine Anpassung der Leuchtdichte, wobei das Experiment beim E-Papier durch den Beamer entweder stärker ([Abb. 16a](#)) oder schwächer ([Abb. 16d](#)) beleuchtet wurde, während beim Bildschirm die Hintergrundbeleuchtung angepasst wurde ([Abb. 15a](#) und [Abb. 15b](#)). Die Reihenfolge von hoher und niedriger Leuchtdichtebereich wurde zwischen allen Probanden abgewechselt. Nach jeder Leuchtdichteanpassung war eine kurze Pause von etwa 3 Minuten notwendig, um den Augen Zeit zu geben, sich an die neue Helligkeit anzupassen, bevor das Experiment fortgesetzt wurde. Bei den 6 Blöcken auf dem E-Papier wurde nach jedem zweiten Block die vom Beamer beleuchtete Fläche verkleinert. Jeder Block bestand aus insgesamt 120 Durchgängen.

Die Probanden begannen auf dem Bildschirm, wo die ersten zwei Blöcke mit hoher und niedriger Leuchtdichtebereich durchgeführt wurden. Die folgenden sechs Blöcke auf dem E-Papier wurden paarweise unter „homogener“ ([Abb. 16a](#) und [Abb. 16d](#)),

danach „vergrößerter“ (Abb. 16b und Abb. 16e) und schließlich „gelber“ (Abb. 16c und Abb. 16f) Beleuchtung durchgeführt.

Für jeden Durchgang im Experiment wurde der simultane Helligkeitskontrastreiz auf der Anzeige gezeigt (siehe Abb. 10). Nach der Hälfte eines Blocks erschien eine Benachrichtigung auf der Anzeige, um eine Pause machen zu können. Die Probanden saßen mit fixiertem Kopf und einem Abstand von 98 cm vor beiden Anzeigen. Die Aufgabe bestand darin, den Blick auf die Mitte zwischen beiden Quadranten zu fokussieren und das hellere Quadrat, links oder rechts, auszuwählen. Für die Wahl des helleren Quadrats verwendeten die Probanden beim E-Papier einen Microsoft-Controller und beim Bildschirm ein RESPONSEPiXX-Gerät von VPixx.

Beim E-Papier trat das Problem auf, dass nach jedem Wechsel der Reizbilder ein Phantombild des vorherigen Bildes sichtbar blieb. Zur Lösung dieses Problems wurde zwischen jedem Wechsel ein weißes und ein graues Bild eingeblendet, was eine Verzögerung von etwa 7 Sekunden zwischen den Wechseln verursachte. Die Probanden wurden auf dieses Problem hingewiesen und darauf aufmerksam gemacht, zu warten, bis wieder ein klares, statisches Bild sichtbar war.

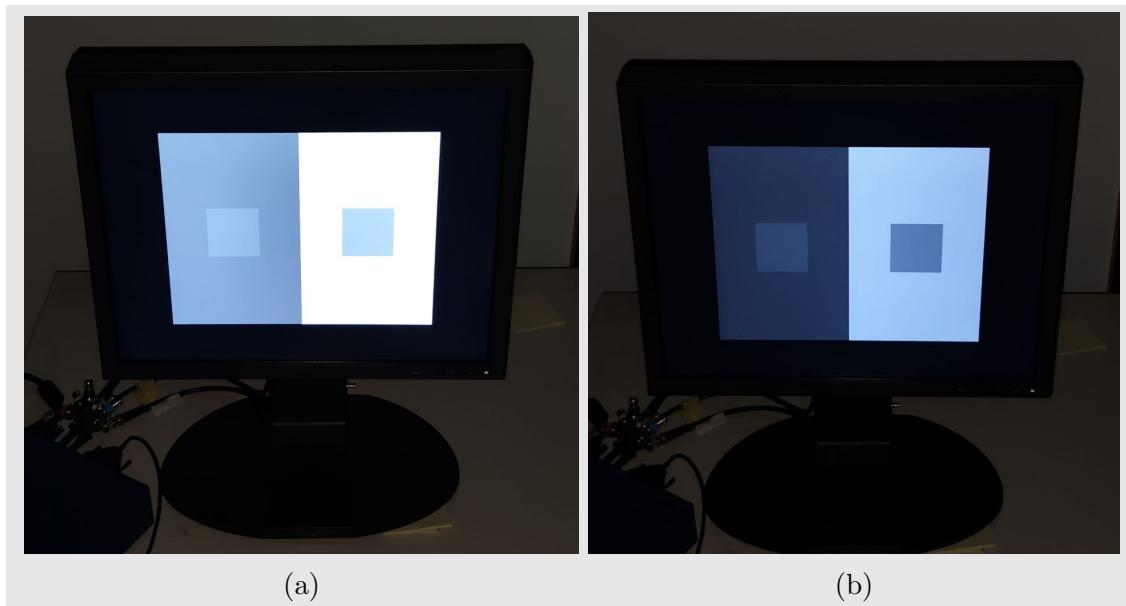


Abbildung 15: Beispielbild des Experiments auf dem Bildschirm. Abb. 15a zeigt das Experiment bei hoher Leuchtdichtebereich, während Abb. 15b es bei niedriger Leuchtdichtebereich darstellt.

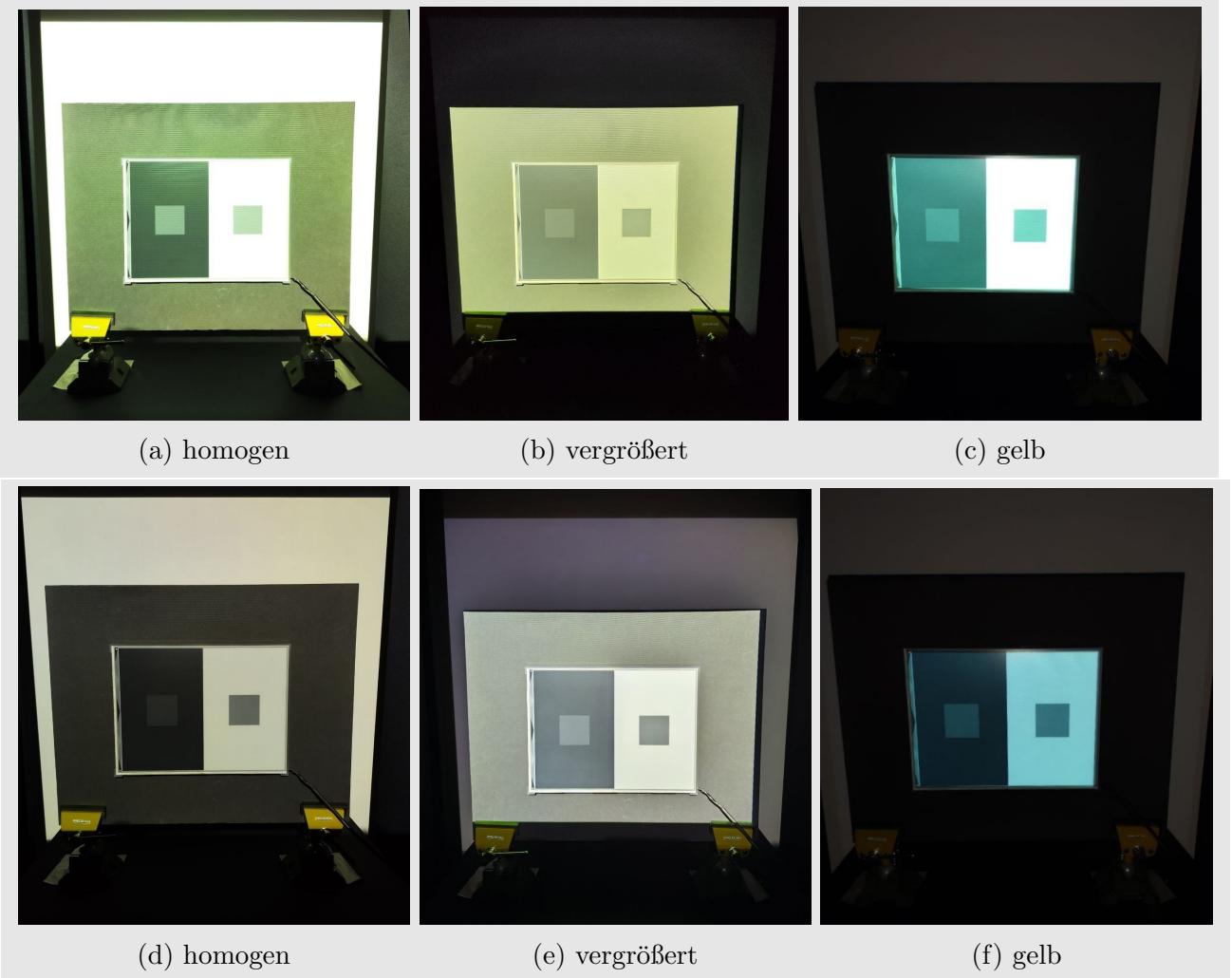


Abbildung 16: Beispielbild des Experiments auf dem E-Papier. Abb. 16a bis Abb. 16c zeigen das Experiment bei hoher Leuchtdichthebereich, während Abb. 16d bis Abb. 16f es bei niedriger Leuchtdichthebereich darstellen. Alle Bilder einer Reihe entsprechen die verschiedene Beleuchtungen

2.5 Experiment

Der Fokus des Experiments lag darauf, zu untersuchen, ob das E-Papier sich ähnlich wie traditionelles Papier verhält. Es wurde erwartet, dass unter homogener Beleuchtung des Reizbildes und des Hintergrunds beim E-Papier eine geringere Magnitude des Effekts auftritt als beim Bildschirm und dass nur bei einer „gelben“ Beleuchtung ähnliche oder höhere Ergebnisse erzielt werden. Falls diese Annahme zutrifft, bestand mit dem Experiment zudem die Intention, genauer zu untersuchen, warum es in (Park, 2024) trotz „homogener“ Beleuchtung beim E-Papier kaum Unterschiede zwischen den beiden Anzeigeformen gab.

Für alle Blöcke des Experiments galten folgende Voraussetzungen: Es gab zwei Hauptbedingungen:

1. Anpassung der Beleuchtungsform: Es wurden drei Beleuchtungsformen verwendet – „gelb“, „vergrößert“ und „homogen“, wobei die Bezeichnungen aus Agostini und Bruno, 1996 übernommen wurden.
2. Anpassung der Leuchtdichte: Es wurde zwischen einem hohen Leuchtdichtebereich mit Werten zwischen 27 und 278,05 cd/m² und einem niedrigen Leuchtdichtebereich mit Werten zwischen 6,918 und 53,9 cd/m² unterschieden.

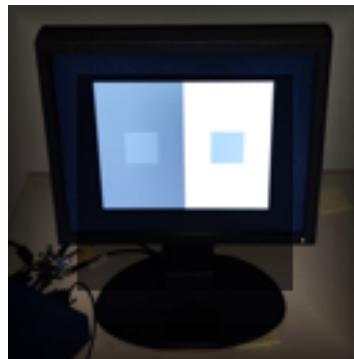
Die einzige unabhängige Variable war der Reflexionsgrad des Targets, während der Reflexionsgrad der Probe von dem Hintergrund abhing, auf dem sie dargestellt wurde. Die Leuchtdichte aller Elemente (Target, Probe, schwarzer und weißer Hintergrund sowie der Hintergrund außerhalb des Reizbildes) war von der jeweiligen Leuchtdichthebedingung abhängig.

3 Ergebnisse

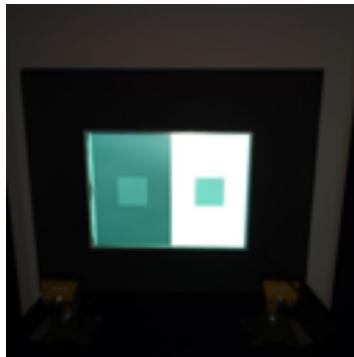
3.1 Psychometrische Funktion

Insgesamt wurde das Experiment mit 8 Probanden im Durchschnittsalter von 26 Jahren an unterschiedlichen Tagen durchgeführt. Aus den Ergebnissen aller Teilnehmer wurden die psychometrischen Funktionen für alle Bedingungen berechnet. Die Funktion wurde jeweils für die Reflexionsgrade der Probe auf dem schwarzen Hintergrund $\{0.1, 0.16, 0.22, 0.28, 0.34, 0.4\}$ und auf dem weißen Hintergrund $\{0.6, 0.66, 0.72, 0.78, 0.84, 0.9\}$ erstellt. Damit ergaben sich zwei psychometrische Funktionen pro Block, also insgesamt 128 Funktionen und 64 unterschiedliche Grafiken.

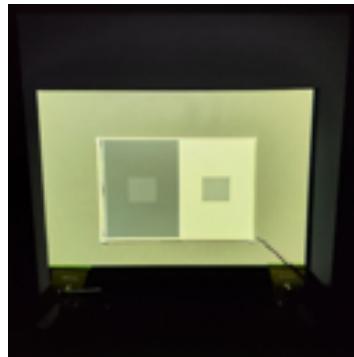
In allen Grafiken befindet sich unten links ein Icon (Abb. 17), das die Kombination aus Anzeigeform und Beleuchtungsbedingung kennzeichnet. Die Bedingung repräsentiert dabei ausschließlich die Beleuchtungsfläche und nicht den Leuchtdichtebereich, da dieser aus dem Wertebereich ersichtlich ist.



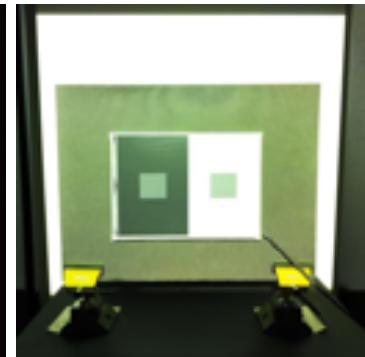
(a) Bildschirm



(b) E-Papier_{gelb}



(c) E-Papier_{vergroeßert}



(d) E-Papier_{homogen}

Abbildung 17: Symbole zur Kennzeichnung der Anzeigeform und Beleuchtungsbedingung

Die Grafiken sind so gestaltet, dass auf der x-Achse die aus den Reflexionsgraden gemessene Leuchtdichte in cd/m^2 abgebildet ist, während die y-Achse die Häufigkeit von 1 bis 10 zeigt, mit der die Probe vor dem Target gewählt wurde. Jeder Punkt repräsentiert dabei eine Leuchtdichte. Für die genaue Zuordnung zwischen Leuchtdichte und Reflexionsgrad siehe Tabelle 2 und Tabelle 4.

Die in Schwarz dargestellte Funktion repräsentiert die Werte der Proben auf dem schwarzen Hintergrund, während die hellgraue Funktion die Werte der Proben auf dem

weißen Hintergrund darstellt. Der PSE einer Funktion wird als roter Punkt angezeigt, ergänzt durch das entsprechende 95%-Konfidenzintervall in Schwarz. Die psychometrischen Funktionen, die PSE-Werte sowie die Konfidenzintervalle wurden mithilfe des Python-Pakets „Psignifit“ (2024) erstellt.

Als Beispiel für die Grafiken im höheren Leuchtdichtebereich siehe Abb. 18, und für den niedrigeren Bereich siehe Abb. 19. Alle Grafiken sind im Anhang unter Unterabschnitt 8.1 abgebildet.

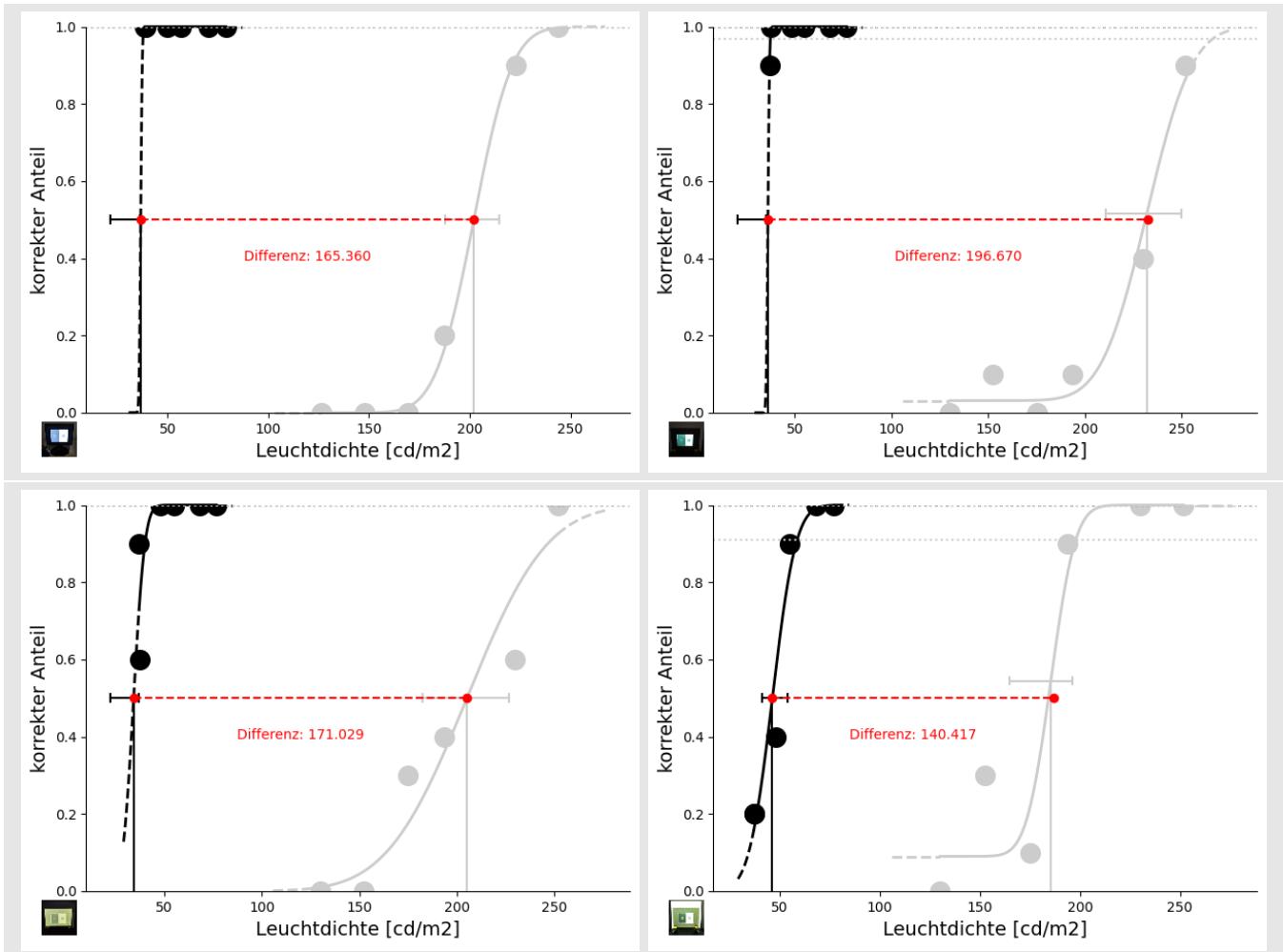


Abbildung 18: Proband: SH

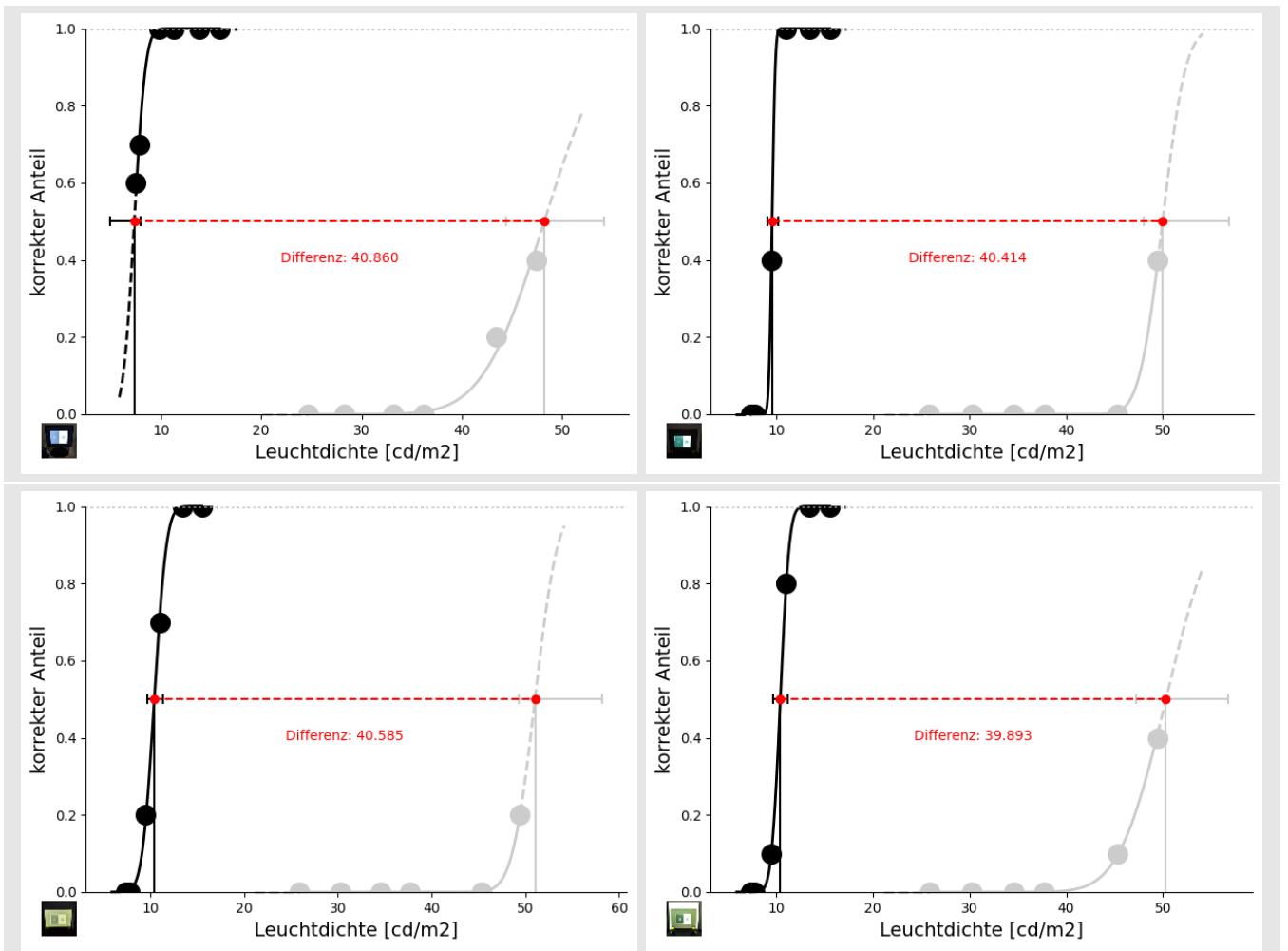


Abbildung 19: Proband: GA

3.1.1 Analyse der psychometrische Funktionen

Das Experiment wurde als erstes mit 2 Probanden (CP und KB) durchgeführt und ausgewertet, bevor es mit den anderen 6 Probanden fortgesetzt wurde. Wie in den Grafiken für beide Probanden erkennbar ist, war keiner der Reflexionsgrade und Leuchtdichten der Punkte in der schwarzen Funktion dunkel genug, um nicht heller als das Target wahrgenommen zu werden (zum Beispiel Abb. 20). Dadurch war die psychometrische Funktion nicht optimal, sodass die gesamte Funktion nur geschätzt werden konnte.

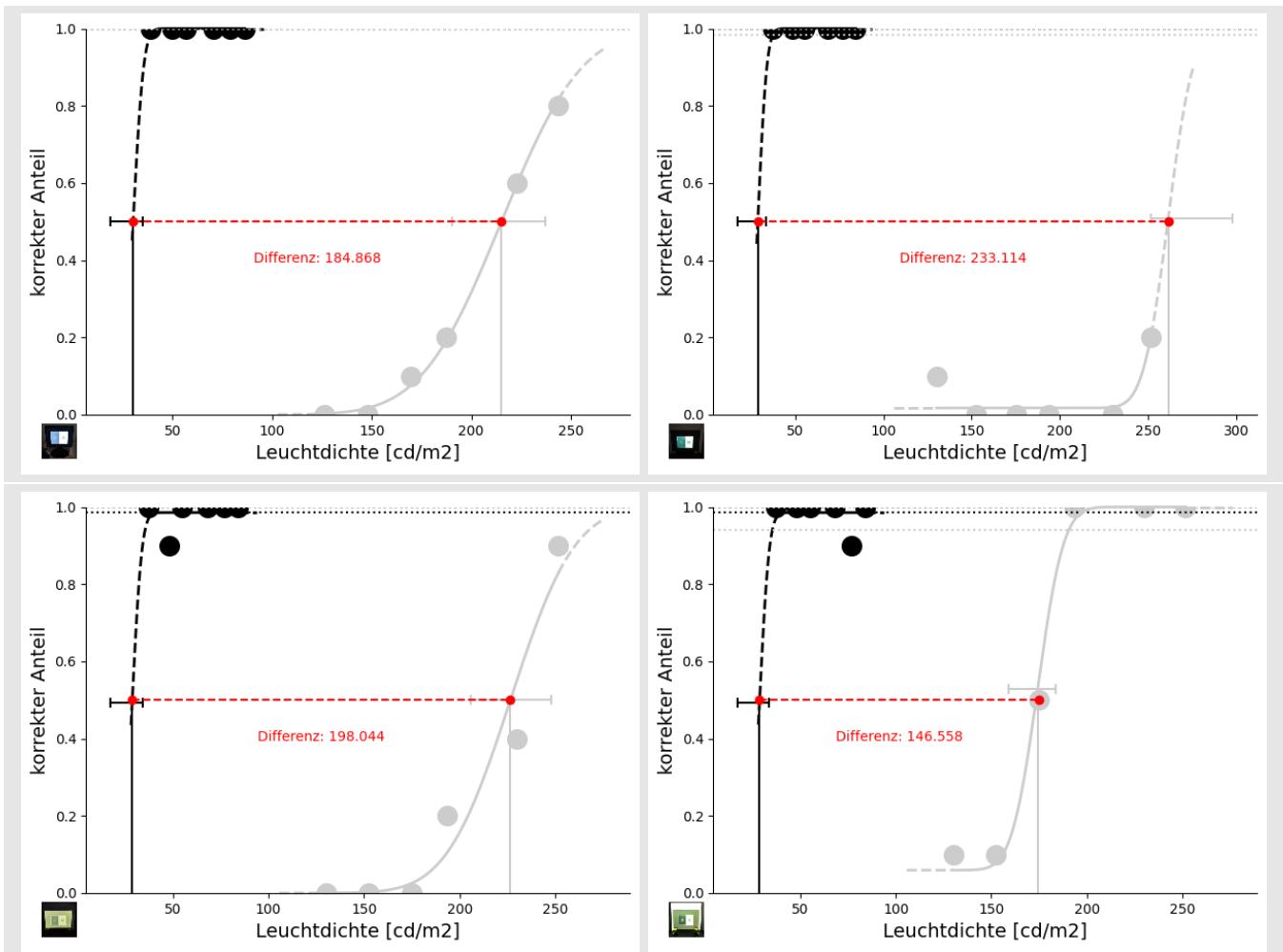


Abbildung 20: Proband: CP

Um dieses Problem zu beheben, wurde das Intervall der Reflexionsgrade des Probe-Quadrats auf dem schwarzen Hintergrund näher an Null verschoben, um niedrigere Werte und damit dunklere Proben zu erhalten. Die Intention war, Werte zu finden, die stets links vom PSE lagen und somit immer dunkler als das Target wahrgenommen wurden. Dabei stieß man jedoch auf eine technische Grenze: Da das E-Papier eine Farbtiefe von 2^4 Bits aufwies, konnten keine Graustufen mit Reflexionsgraden $\in [0, 0.07)$ dargestellt werden. Solche kleinen Werte wurden vom E-Papier als Schwarz angezeigt, wodurch das Quadrat nicht mehr vom Hintergrund unterscheidbar war.

Die neuen Reflexionsgrade und die entsprechenden Leuchtdichten für die schwarze Funktion sind in [Tabelle 5](#) dargestellt. Da sich die Konfidenzintervalle dieser Funktionen mit den Konfidenzintervallen der anderen Probanden überlappten und die Änderung der Reflexionsgrade und Leuchtdichten minimal war, wurde angenommen, dass der Unterschied zwischen den alten und neuen Werten nicht signifikant war. Daher wurden die Ergebnisse beider Probanden in die Auswertung einbezogen.

Es ist jedoch zu beachten, dass die minimale Leuchtdichte bei den Probanden CP und KB um etwa $0,4\text{cd}/\text{m}^2$ höher war als die minimale Leuchtdichte bei den anderen Probanden.

Positionierung:	Reflexionsgrad der Probe Target auf Weiß, Probe auf Schwarz	Leuchtdichte in cd/m ²	
		Anzeigeform	Anzeigeform
		Bildschirm	E-Papier
bei hoher Leuchtdichtebereich	0.07	38.97	37
	0.1	39.19	37.4
	0.16	49.91	48.09
	0.22	56.93	54.96
	0.28	70.37	68.19
	0.34	78.9	76.7
bei niedriger Leuchtdichtebereich	0.07	7.53	7.4
	0.1	7.89	7.792
	0.16	9.8	9.492
	0.22	11.26	11.04
	0.28	13.78	13.44
	0.34	15.86	15.52

Tabelle 5: Neues Mapping des Reflexionsgrads und Leuchtdichte Probe-Quadrats

Bei der Analyse aller psychometrischen Funktionen zeigen sich deutliche Unterschiede in der Datenstreuung unter den verschiedenen Bedingungen. Im hohen Leuchtdichtenbereich scheinen die Daten für den Bildschirm am stabilsten zu sein, was durch enge Konfidenzintervalle und eine geringe Streuung der einzelnen Funktionen bestätigt wird. Da Bildschirme klare und homogene Kontraste bieten, könnte dies zu einer konsistenteren Wahrnehmung führen. Im Gegensatz dazu weist das E-Papier bei homogener Beleuchtung eine größere Streuung der Daten auf. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Reflexionseigenschaften des E-Papiers und die Lichtverteilung die Wahrnehmung variabler machen. Bei („gelber“) Beleuchtung des E-Papiers ähnelt die Streuung der des Bildschirms, was auf eine Stabilisierung des Kontrastverhaltens hindeutet.

Bei der Betrachtung der Grafiken im niedrigen Leuchtdichtenbereich zeigen sich ähnliche Ergebnisse. Die Bedingung homogener Beleuchtung beim E-Papier weist erneut die größte Datenstreuung auf. Eine mögliche Ursache könnte darin liegen, dass die geringe Helligkeit das Erkennen von Kontrasten erschwert, wodurch es den Probanden schwerer fiel, das hellste Quadrat zu identifizieren. Auch hier zeigt der Bildschirm die geringste Streuung, was darauf zurückzuführen sein könnte, dass Bildschirme auch im niedrigen Leuchtdichtenbereich stabil bleiben. Die gelbe Beleuchtung beim E-Papier zeigt erneut eine moderate Streuung, ähnlich wie im hohen Leuchtdichtenbereich. Die Rangfolge der Streuung lautet: (Bildschirm → E-Papier_{gelb} → E-Papier_{vergroeßert} → E-Papier_{homogen}), wobei der Bildschirm die geringste und das E-Papier bei homogener Beleuchtung die größte Streuung aufweist.

Die Analyse der Varianz bestätigt ebenfalls diese Ergebnisse. Sie zeigt, dass der Bildschirm in Bezug auf die Wahrnehmungskonsistenz besser abschneidet, während das E-Papier, insbesondere bei homogener Beleuchtung und im niedrigen Leuchtdichtenbereich, Herausforderungen in der Kontrastwahrnehmung aufweist.

3.2 Magnitude des Effekts

Um die genaue Magnitude des Effekts pro Bedingung und Anzeige zu bestimmen, wurde zunächst der PSE aus den Grafiken entnommen. Aus den PSE-Werten einer Grafik wurde die Differenz berechnet, die in den Grafiken in roter Farbe dargestellt ist. Die Tabellen [Tabelle 6](#) und [Tabelle 7](#) zeigen die Werte im hohen Leuchtdichtenbereich, während [Tabelle 8](#) und [Tabelle 9](#) die Werte im niedrigen Leuchtdichtenbereich darstellen.

Für alle vier Tabellen gilt Folgendes: Die erste Spalte referenziert die Grafik, aus der die Daten entnommen wurden. Die zweite Spalte (PSE1) enthält den PSE der schwarzen Funktion, während die dritte Spalte (PSE2) den PSE der hellgrauen Funktion darstellt. Die Differenz der beiden PSE-Werte, welche die Magnitude des Effekts angibt, findet sich in der vierten Spalte.

Aus den Werten der Tabellen und den PSE-Werten lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Bei hoher Leuchtdichtebereich zeigen die PSE-Daten deutliche Unterschiede in der Wahrnehmung. Der Bildschirm weist konsistent hohe Differenzen zwischen den Punkten subjektiver Gleichheit (PSE1 und PSE2) auf, die zwischen 142.32 und 203.72 cd/m^2 liegen. Diese Werte unterstreichen die Fähigkeit des Bildschirms, bei hoher Leuchtdichtebereich klare und deutliche Kontrastunterschiede zu bieten, was die Wahrnehmung wesentlich unterstützt.

Beim E-Papier variieren die Ergebnisse je nach Beleuchtungsbedingung. Unter homogener Beleuchtung sind die Differenzen mit 140.41 bis 227.28 cd/m^2 geringer, was auf eine reduzierte Kontrastklarheit hinweist. Die gelbe Beleuchtung zeigt hingegen die höchsten Differenzen von bis zu 233.11 cd/m^2 , was eine deutliche Verbesserung des Kontrastverhaltens des E-Papiers durch diese Beleuchtungsart belegt. Die vergrößerte Beleuchtung liegt mit Differenzen zwischen 146.21 und 207.18 cd/m^2 ebenfalls auf einem hohen Niveau, weist jedoch eine größere Variabilität auf.

Bei niedriger Leuchtdichtebereich sind die Differenzen bei allen Bedingungen deutlich geringer. Der Bildschirm bleibt mit konstanten Werten zwischen 24.39 und 43.50 cd/m^2 eine zuverlässige Option, die auch bei reduzierter Helligkeit eine klare Wahrnehmung ermöglicht. Beim E-Papier zeigt sich, dass die homogene Beleuchtung mit Differenzen zwischen 22.43 und 39.89 cd/m^2 die schwächsten Kontrastunterschiede liefert, was auf eine eingeschränkte Wahrnehmungsfähigkeit hinweist. Die gelbe Beleuchtung verbessert die Kontraste erneut und erreicht durchweg die höchsten Differenzen von bis zu 47.53 cd/m^2 . Die vergrößerte Beleuchtung liegt mit moderaten Differenzen zwischen 27.06 und 42.38 cd/m^2 und damit zwischen den anderen beiden Bedingungen.

cd/m^2	Bildschirm		
	PSE1	PSE2	Diff
Abb. 27	30.28	215.148	184.868
Abb. 28	30.28	214.562	184.282
Abb. 29	39.72	226.483	186.764
Abb. 30	39	242.725	203.723
Abb. 31	36.542	178.864	142.322
Abb. 32	34.615	185.532	150.917
Abb. 33	36.684	202.044	165.36
Abb. 34	34.494	203.121	168.627

Tabelle 6: PSE der Funktionen auf dem Bildschirm bei hoher Leuchtdichtebereich. PSE1 ist der Punkt subjektiver Gleichheit der schwarzen Funktionen, und PSE2 ist der der hellgrauen Funktionen.

cd/m^2	E-Papier _{hom.}			E-Papier _{verg.}			E-Papier _{gelb.}		
	PSE1	PSE2	Diff	PSE1	PSE2	Diff	PSE1	PSE2	Diff
Abb. 27	28.548	175.106	146.558	28.563	226.607	198.044	28.623	261.738	233.114
Abb. 28	36.975	185.18	148.205	28.623	225.162	196.539	28.623	247.75	219.127
Abb. 29	40.214	231.521	191.307	39.44	246.627	207.187	36.308	235.255	198.948
Abb. 30	47.699	274.983	227.284	52.973	254.974	202	51.867	250.853	198.986
Abb. 31	35.937	186.548	150.611	34.754	193.449	158.696	34.569	196.095	161.526
Abb. 32	36.078	194.887	158.809	32.791	178.996	146.205	33.536	184.564	151.028
Abb. 33	46.258	186.675	140.417	34.213	205.242	171.029	36.022	232.692	196.67
Abb. 34	32.149	223.889	191.74	42.549	240.9134	198.364	41.708	248.849	207.141

Tabelle 7: PSE der Funktionen auf dem E-Papier unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen bei hoher Leuchtdichtebereich. PSE1 ist der Punkt subjektiver Gleichheit der schwarzen Funktionen, und PSE2 ist der der hellgrauen Funktionen.

cd/m^2	Bildschirm.		
	PSE1	PSE2	Diff
Abb. 35	6.158	46.281	40.122
Abb. 36	6.158	49.66	43.501
Abb. 37	7.866	44.163	36.297
Abb. 38	7.355	48.215	40.86
Abb. 39	7.43	39.953	32.524
Abb. 40	6.847	31.241	24.395
Abb. 41	6.847	42.965	36.118
Abb. 42	6.525	42.325	35.8

Tabelle 8: PSE der Funktionen auf dem Bildschirm bei niedriger Leuchtdichtebereich. PSE1 ist der Punkt subjektiver Gleichheit der schwarzen Funktionen, und PSE2 ist der der hellgrauen Funktionen.

cd/m^2	E-Papier _{hom.}			E-Papier _{verg.}			E-Papier _{gelb.}		
	PSE1	PSE2	Diff	PSE1	PSE2	Diff	PSE1	PSE2	Diff
Abb. 35	7.354	29.785	22.431	6.128	35.981	29.853	6.128	53.656	47.528
Abb. 36	7.189	39.971	32.782	6.707	39.021	32.314	6.128	51.35	45.222
Abb. 37	7.849	46.925	39.076	7.592	49.973	42.381	7.756	46.968	39.212
Abb. 38	10.429	50.322	39.893	10.447	51.033	40.585	9.559	49.973	40.414
Abb. 39	7.016	39.126	32.11	6.75	38.996	32.246	6.956	38.847	31.89
Abb. 40	6.693	41	34.307	6.935	36.982	30.047	6.521	35.591	29.07
Abb. 41	8.057	41.903	33.846	7.195	44.62	37.425	7.068	48.402	41.335
Abb. 42	7.616	36.815	29.199	6.256	33.312	27.056	9.904	39.885	29.981

Tabelle 9: PSE der Funktionen auf dem E-Papier unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen bei niedriger Leuchtdichtebereich. PSE1 ist der Punkt subjektiver Gleichheit der schwarzen Funktionen, und PSE2 ist der der hellgrauen Funktionen.

Aus den Differenzen der PSE-Werte wurde schließlich der Durchschnitt berechnet, um zu vergleichen, wie stark die Unterschiede zwischen den verschiedenen Bedingungen waren. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Durchschnitt der Magnitude in cd/m^2

Anzeigeform	Im hohen Leuchtdichtebereich	Im niedrigen Leuchtdichtebereich
	173.358	36.202
	169.366	32.956
	184.758	33.988
	195.817	38.081

Aus dem Vergleich der Durchschnitte zeigt sich eine Tendenz, die die Hypothese bestätigt. Sowohl im hohen als auch im niedrigen Leuchtdichtenbereich ist die Magnitude des Effekts beim E-Papier unter homogener Beleuchtung geringer als beim Bildschirm. Bei vergrößerter Beleuchtungsfläche übertrifft die Größe des Effekts beim E-Papier die des Bildschirms, jedoch nur im hohen Leuchtdichtenbereich. Nur bei gelber Beleuchtung sind die Werte unter beiden Leuchtdichtbedingungen höher beim E-Papier.

Die Tendenz zeigt, dass je größer der Kontrast zwischen Hintergrund und Reizbild ist, desto größer die Magnitude des Effekts wird. Somit ist der Effekt bei Experimenten mit einer größeren Beleuchtungsfläche, die sowohl das Reizbild als auch den Hintergrund erfasst, kleiner. Je enger die Beleuchtungsfläche jedoch am Reizbild anliegt, desto größer scheint der Effekt zu werden.

Im niedrigen Leuchtdichtenbereich weichen die Größen des Effekts nicht stark von einander ab, mit einem Maximum von $1.88cd/m^2$. Im hohen Leuchtdichtenbereich scheint hingegen ein größerer Unterschied zu bestehen, mit einem Maximum von 26.452

cd/m^2 zwischen den Bedingungen. Allerdings war der Unterschied zwischen Bildschirm und E-Papier bei homogener Beleuchtung nicht so groß wie erwartet.

Die Betrachtung der Durchschnittswerte liefert eine globale Tendenz der Wahrnehmung unter den verschiedenen Bedingungen. Da diese Werte jedoch aus den PSE-Werten berechnet wurden, die, wie der Name bereits andeutet, subjektive Werte mit einer höheren Fehleranfälligkeit sind, ist es unerlässlich, Konfidenzintervalle für diese Differenzen zu berechnen.

Die Analyse dieser Konfidenzintervalle ermöglicht die Beurteilung, ob die Unterschiede zwischen den Bedingungen statistisch signifikant und damit relevant sind. Falls sich die Intervalle nicht überlappen, kann man mit Sicherheit davon ausgehen, dass es einen statistisch relevanten Unterschied zwischen den Anzeigen und Beleuchtungsbedingungen gibt.

3.3 Berechnung der Randdichte und neuen Konfidenzintervall

Da die Berechnung eines solchen Konfidenzintervalls keine triviale Aufgabe ist, wurde der Prozess wie folgt durchgeführt. Zunächst wurde der PSE als Schwellenwert definiert, da dieser der Punkt ist, an dem eine 50%-ige Wahrscheinlichkeit für eine korrekte Antwort besteht. Die Unsicherheiten bei der Schätzung des Schwellenwerts wurden durch die Randdichte erfasst, die aus den Daten und dem Modell der psychometrischen Funktion abgeleitet wurde.

Um die Berechnungen zu vereinfachen, wurden die Randdichte näherungsweise als Gauß-Verteilungen modelliert (zum Beispiel [Abb. 21a](#)). Diese Annahme ist aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes und der typischen Form der Verteilungen in diesem Kontext gerechtfertigt (Weigand, 2009, S.221). Für jede Funktion wurden aus den angepassten Randdichten die Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt.

Die Differenz der Schwellenwerte wurde berechnet, indem die Mittelwerte der beiden Verteilungen subtrahiert wurden. Dabei wurde angenommen, dass die Bedingungen unabhängig sind, was aufgrund der Verwendung von zwei psychometrischen Funktionen mit unterschiedlichen Leuchtdichten gerechtfertigt ist.

Die Varianz der Differenz ergab sich aus der Summe der Varianzen der beiden Randdichten. Da die Differenz zweier gaußverteilter Variablen ebenfalls einer Gauß-Verteilung folgt, konnte die Verteilung dieser Differenz analytisch beschrieben werden. Auf Basis dieser Verteilung wurde das 95%-Konfidenzintervall berechnet ([Abb. 21b](#)). Die Grenzen des Konfidenzintervalls wurden mit der inversen kumulativen Verteilungsfunktion (Quantilsfunktion) der Differenz-Gauß-Verteilung bestimmt.

Diese Methodik war notwendig, um die Unsicherheiten in der Schätzung der Schwellenwerte korrekt zu berücksichtigen und eine präzise statistische Absicherung zu gewährleisten. Die Gauß-Approximation ermöglichte eine effiziente Berechnung der Differenz und des Konfidenzintervalls, ohne auf numerische Simulationen wie die Monte-Carlo-Methoden zurückgreifen zu müssen.

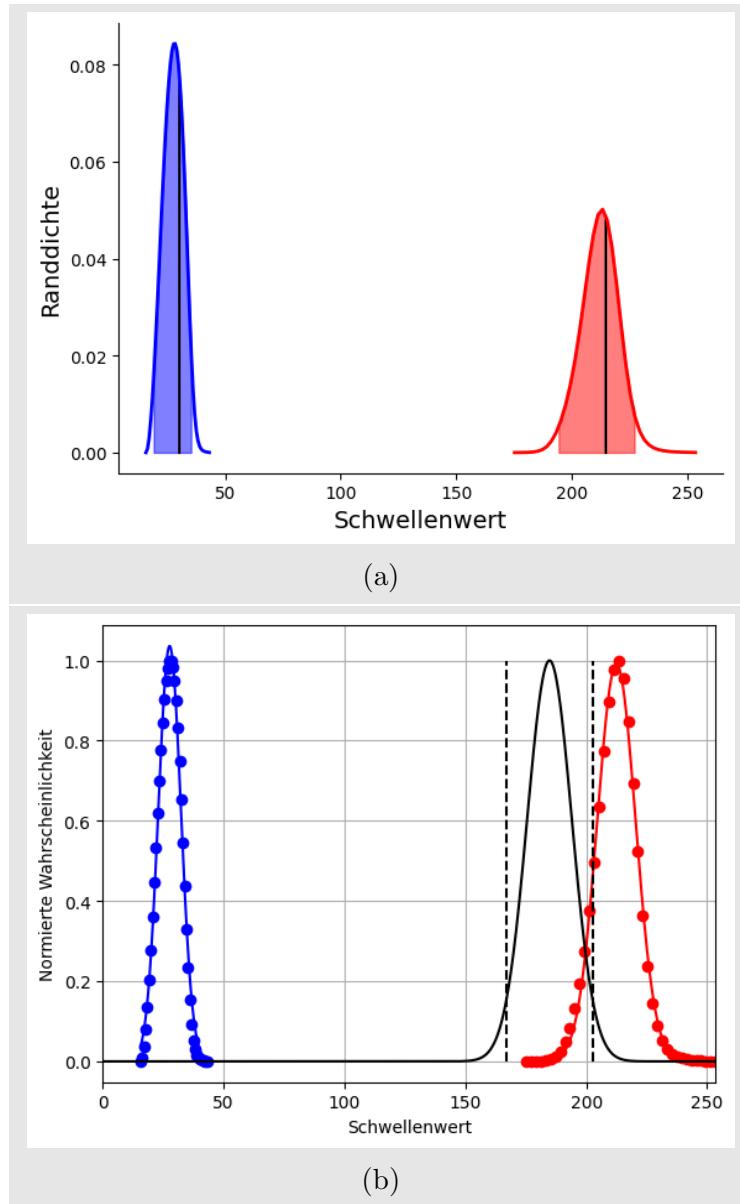


Abbildung 21: Abb. 21a zeigt die Berechnung der Randdichte und deren Gauß-Approximation. Abb. 21b stellt die Berechnung des Konfidenzintervalls der Magnitude des Effekts dar.

3.4 Ergebnisse mit Konfidenzintervall

Aus der Berechnung ergibt sich letztendlich folgende Magnitude des Helligkeitskontrasteffekts mit den entsprechenden 95%-Konfidenzintervallen für beide Anzeigeformen. Jede Tabelle repräsentiert eine Kombination aus Anzeige- und Beleuchtungsform.

In der ersten Spalte wird angegeben, von welchem Probanden die Daten stammen. Die Spalte Diff. gibt die Differenz der beiden PSE-Funktionen aus den Abschnitten 8.1.1 und 8.1.2 an, die als Maß für die Größe des Helligkeitskontrasteffekts dient. Das zugehörige 95%-Konfidenzintervall, basierend auf dieser Differenz, ist in der Spalte Konfidenzintervall aufgeführt.

Bildschirm				
cd/m^2	hoher Leuchtdichtebereich		niedriger Leuchtdichtebereich	
Proband	Diff.	Konfidenzintervall	Diff.	Konfidenzintervall
CP	184.868	[163.769, 209.627]	40.122	[37.596, 43.895]
KB	184.282	[166.74, 202.855]	43.501	[41.135, 51.24]
DC	186.764	[170.586, 192.345]	36.297	[34.203, 37.86]
GA	203.723	[184.13, 226.497]	40.86	[36.823, 46.243]
MI	142.322	[132.024, 156.926]	32.524	[29.302, 36.523]
OO	150.917	[137.251, 169.651]	24.395	[22.552, 27.985]
SH	165.36	[155.234, 187.015]	36.118	[34.072, 39.625]
YC	168.627	[152.214, 190.125]	35.8	[31.563, 39.603]

Tabelle 11: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

E-Papier _{gelb}				
cd/m^2	hoher Leuchtdichtebereich		niedriger Leuchtdichtebereich	
Proband	Diff.	Intervall	Diff.	Intervall
CP	233.114	[218.875, 272.677]	47.528	[44.623, 54.499]
KB	219.127	[192.116, 252.028]	45.222	[40.815, 51.517]
DC	198.948	[183.869, 215.87]	39.212	[36.749, 41.106]
GA	198.986	[178.386, 222.691]	40.414	[37.569, 45.22]
MI	161.526	[146.064, 176.036]	31.89	[30.125, 35.612]
OO	151.028	[136.384, 168.116]	29.07	[26.974, 34.391]
SH	196.67	[184.049, 220.133]	41.335	[39.262, 46.37]
YC	207.141	[167.837, 232.774]	29.981	[23.663, 35.418]

Tabelle 12: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

E-Papier _{vergrößert}				
cd/m^2	hoher Leuchtdichtebereich		niedriger Leuchtdichtebereich	
Proband	Diff.	Intervall	Diff.	Intervall
CP	198.044	[167.837, 232.774]	29.853	[23.663, 35.418]
KB	196.539	[168.156, 215.32]	32.314	[27.49, 37.515]
DC	207.187	[187.817, 226.201]	42.381	[39.572, 47.286]
GA	202	[186.684, 227.025]	40.585	[37.649, 47.333]
MI	158.696	[146.835, 182.735]	32.246	[30.273, 36.056]
OO	146.205	[104.824, 182.846]	30.047	[26.857, 34.468]
SH	171.029	[150.855, 194.307]	37.425	[34.672, 42.375]
YC	198.364	[165.618, 238.67]	27.056	[24.888, 30.768]

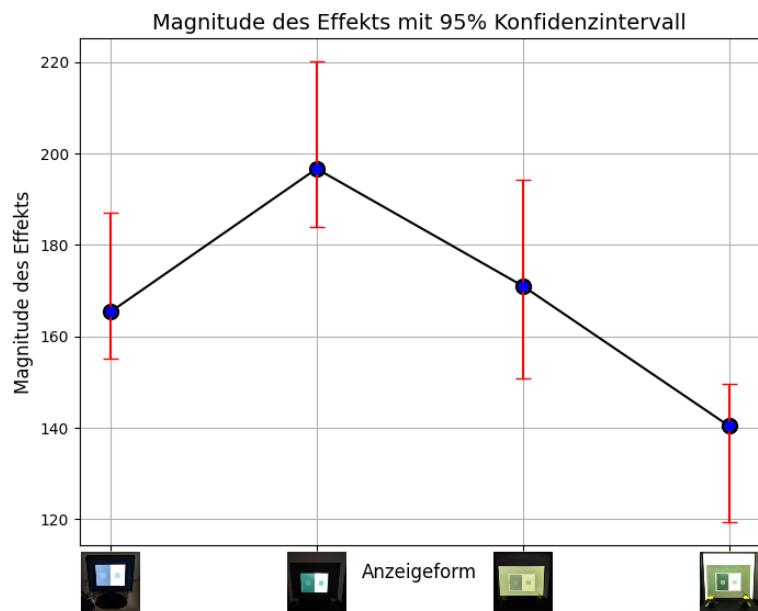
Tabelle 13: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

E-Papier _{homogen}				
cd/m^2	hoher Leuchtdichtebereich		niedriger Leuchtdichtebereich	
Proband	Diff.	Intervall	Diff.	Intervall
CP	146.558	[133.211, 161.444]	22.431	[19.205, 25.554]
KB	148.205	[138.165, 168.833]	32.782	[27.283, 36.01]
DC	191.307	[178.347, 202.302]	39.076	[35.987, 41.481]
GA	227.284	[210.697, 258.109]	39.893	[36.057, 45.101]
MI	150.611	[139.622, 163.577]	32.11	[29.678, 35.595]
OO	158.809	[125.062, 195.713]	34.307	[30.151, 39.416]
SH	140.417	[119.339, 149.529]	33.846	[28.647, 36.543]
YC	191.74	[161.653, 217.529]	29.199	[26.604, 34.326]

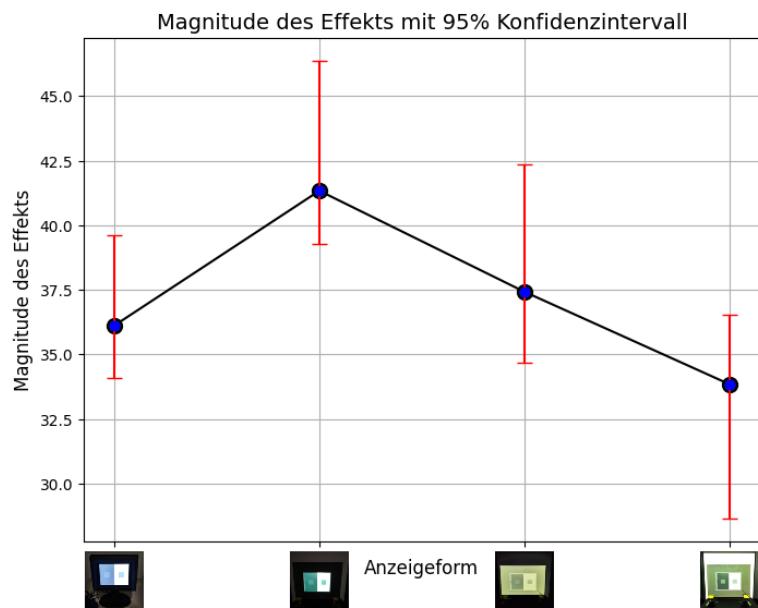
Tabelle 14: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

Aus der Magnitude des Effekts und den neu berechneten Konfidenzintervallen wurden die Ergebnisse für jeden Probanden zusammengefasst und in Grafiken dargestellt (z.B. [Abb. 22](#) und [Abb. 23](#)). Alle Grafiken der Ergebnisse sind im Anhang [Unterabschnitt 8.2](#) dargestellt. Für alle Probanden werden die Grafiken paarweise dargestellt. Die oberen Grafiken zeigen die Daten der Messungen im hohen Leuchtdichtenbereich, während die unteren Grafiken die Ergebnisse im niedrigen Leuchtdichtenbereich darstellen.

Auf der x-Achse der Grafiken sind die Anzeigeformen sowie die jeweiligen Beleuchtungsbedingungen (gelb, vergrößert, homogen) abgebildet. Die y-Achse zeigt die berechnete Magnitude des Effekts der jeweiligen Anzeigeform für jeden Probanden, ausgedrückt in cd/m^2 . Jeder Punkt in den Grafiken repräsentiert eine Magnitude, wobei das zugehörige 95%-Konfidenzintervall in Rot dargestellt ist.

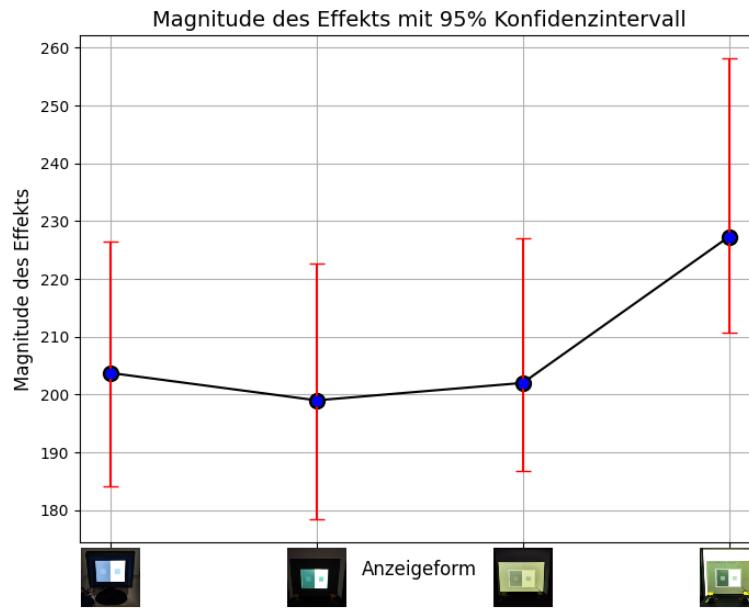


(a) Proband: SH

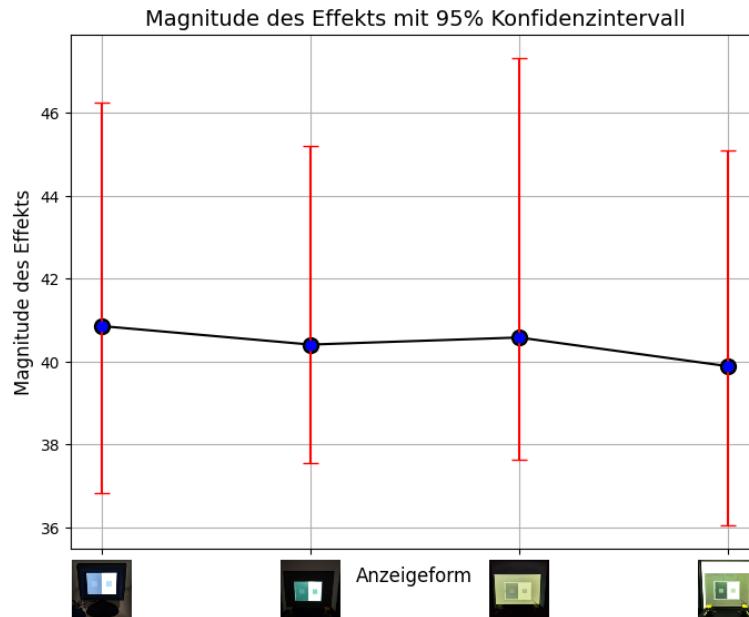


(b) Proband: SH

Abbildung 22: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall



(a) Proband: GA



(b) Proband: GA

Abbildung 23: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

Bei den meisten Grafiken zeigt das E-Papier unter gelber Beleuchtung den größten Helligkeitskontrasteffekt. Es gibt jedoch Probanden (Abb. 46 und Abb. 48), bei denen, entgegen der Hypothese, die homogene Beleuchtung den größten Effekt aufweist. Zudem scheint ein relevanter Unterschied zwischen gelber und homogener Beleuchtung zu bestehen, da die Konfidenzintervalle keine Schnittmenge haben und weit voneinander entfernt liegen (Abb. 43 und Abb. 49). Bei vergrößerter Beleuchtung gibt es in fast allen Fällen eine Überlappung der Konfidenzintervalle mit gelber und homogener Beleuchtung. Dies wurde erwartet, da die vergrößerte Form als Übergangsform betrachtet wird.

Für den Bildschirm scheint es bei bestimmten Probanden, entgegen den Ergebnissen von Park, 2024, einen relevanten Unterschied zwischen Bildschirm und E-Papier bei homogener Beleuchtung zu geben (Abb. 43, Abb. 44 und Abb. 49), da in diesen Grafiken keine Überlappungen zwischen den Konfidenzintervallen vorliegen. Dennoch gibt es bei vielen Probanden Überlappungen der Intervalle beider Anzeigen unter allen Bedingungen. Man kann daher nicht ausschließen, dass statistisch relevante Unterschiede zwischen beiden Anzeigen unabhängig von der Beleuchtungsbedingung existieren.

Bei zwei Teilnehmern haben die niedrigen Leuchtdichtenbereiche dafür gesorgt, dass die Unterschiede im Effekt verringert wurden, was zu einer Konvergenz der Ergebnisse führt.

Um die Gesamtheit der Ergebnisse besser analysieren zu können, wurde für jeden Mittelwert der Standardfehler (SE) berechnet. Da der Standardfehler die Abweichung des Mittelwerts der Stichprobe vom tatsächlichen Mittelwert angibt, ermöglichte dies einen präziseren Vergleich der Ergebnisse.

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Die Mittelwerte mit den jeweiligen Standardfehlern (SE) wurden in zwei Grafiken dargestellt (Abb. 24), um die Differenzen besser zu veranschaulichen. Diese Grafiken sind analog zu den vorherigen aufgebaut, mit dem einzigen Unterschied, dass die Intervalle in Rot den SE repräsentieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass unabhängig vom Leuchtdichtebereich das E-Papier unter gelber Beleuchtung die größte Magnitude des Helligkeitskontrasteffekts aufweist. Im hohen Leuchtdichtebereich scheint es einen relevanten Unterschied zu homogener Beleuchtung und zum Bildschirm zu geben, da keine Überlappungen der Intervalle vorliegen. Dies bestätigt, dass der tatsächliche Mittelwert unter gelber Beleuchtung größer ist als bei den beiden anderen Bedingungen. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Park, 2024 scheint es bei einer globalen Betrachtung der Ergebnisse im hohen Leuchtdichtebereich keinen relevanten Unterschied zwischen Bildschirm und E-Papier bei homogener Beleuchtung zu geben. Im Gegensatz dazu lässt sich im niedrigen Leuchtdichtebereich ein solcher Unterschied nicht ausschließen (Abb. 24). Hier zeigt der Bildschirm eine größere Magnitude des Effekts. Da jedoch eine Schnittmenge zwischen den Intervallen besteht, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob dieser Unterschied relevant ist. Im niedrigen Leuchtdichtebereich zeigt sich laut den Ergebnissen nur ein relevanter Unterschied zwischen dem E-Papier unter gelber und homogener Beleuchtung.

Eine Vergrößerung der Beleuchtungsfläche außerhalb des Reizbildes führt zu einer Verringerung der Magnitude des Effekts. Diese Beobachtung wird auch durch die Ergebnisse aus Experiment 2 von Agostini und Bruno, 1996 bestätigt. Aus diesem Experiment lässt sich jedoch nicht exakt bestimmen, wie stark der Einfluss der Beleuchtungsfläche auf den Helligkeitskontrasteffekt ist, da sich die Standardfehlerintervalle der einzelnen Bedingungen teilweise überschneiden.

Aus den Grafiken wird zudem ersichtlich, dass die vergrößerte Bedingung beim E-Papier eine Übergangsform zwischen den anderen beiden Bedingungen darstellt. Im hohen Leuchtdichtebereich liefert sie entweder bessere oder zumindest vergleichbare Ergebnisse wie der Bildschirm. Im niedrigen Leuchtdichtebereich scheint diese Bedin-

gung schlechter abzuschneiden. Allerdings lässt sich in keinem Bereich ausschließen, dass die Unterschiede irrelevant sind.

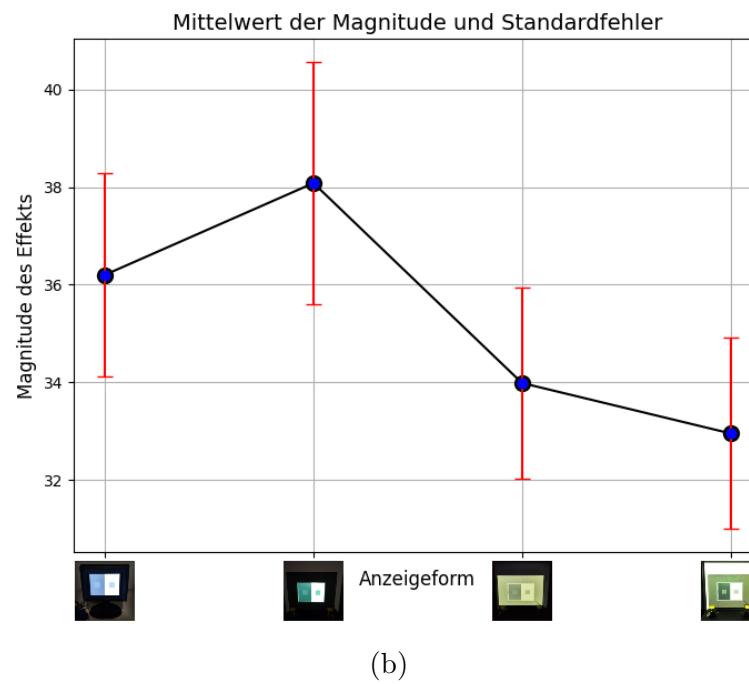
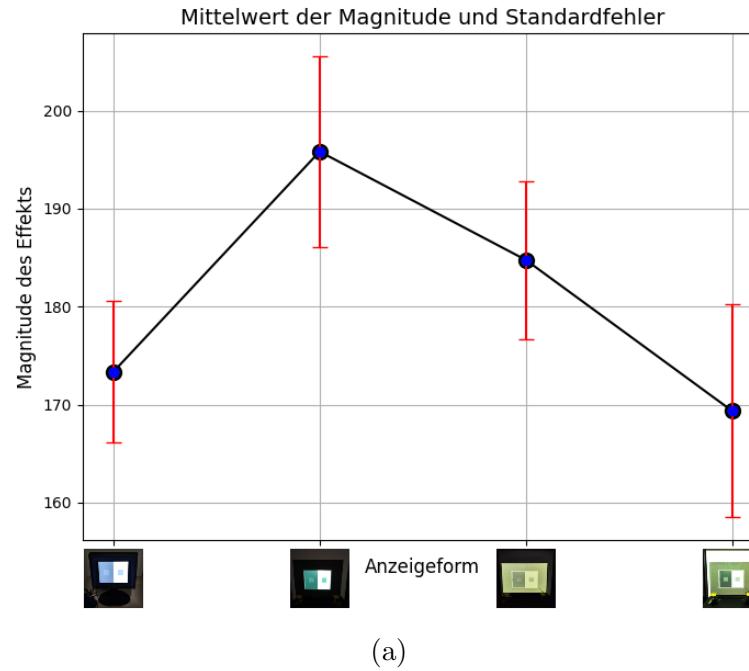


Abbildung 24: Caption

4 Diskussion

In dieser Arbeit wurde der simultane Helligkeitskontrast in Bezug auf zwei unterschiedliche Anzeigeformen untersucht: E-Papier und Bildschirm. Ziel der Arbeit war es, den Effekt von Beleuchtung auf den Helligkeitskontrast zu erforschen und dabei die Frage zu klären, ob sich E-Papier ähnlich wie traditionelles Papier verhält, insbesondere im Hinblick auf den Helligkeitskontrasteffekt unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen, wie es im ersten und zweiten Experiment von (Agostini und Bruno, 1996) untersucht wurden.

Das Experiment konzentrierte sich auf die Wahrnehmung der Helligkeit zwischen einem Target und einer Probe, die auf unterschiedlich beleuchteten Hintergründen dargestellt wurden. Die Hypothese lautete, dass unter gelber Beleuchtung der Effekt auf E-Papier vergleichbar mit dem auf Bildschirmen wäre, während bei homogener Beleuchtung der Helligkeitskontrasteffekt auf E-Papier geringer ausfiele. Ziel war es, die Unterschiede im Helligkeitskontrasteffekt unter den verschiedenen Beleuchtungsbedingungen und zwischen den beiden Anzeigeformen zu verstehen. Dabei wurde insbesondere die Rolle der Beleuchtungsfläche und der Leuchtdichte als Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung des Helligkeitskontrasts untersucht.

4.1 Bewertung der Fragestellung und Hypothese

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Wahrnehmung des simultanen Helligkeitskontrastes auf E-Papier bei homogener Beleuchtung und niedrigem Leuchtdichtebereich die größte Streuung und Variabilität aufweist. Diese Variabilität deutet auf eine unsichere Kontrastwahrnehmung hin und legt nahe, dass E-Papier bei homogenen Beleuchtungsbedingungen, insbesondere bei niedriger Leuchtdichte, nur eingeschränkt geeignet ist, vor allem in Anwendungen, die eine konsistente visuelle Wahrnehmung erfordern. Im Gegensatz dazu bleibt der Bildschirm unter allen Bedingungen die stabilste und zuverlässigste Anzeigeform, was seine Eignung für präzise Anwendungen unterstreicht.

Die Schlussfolgerungen aus den Experimenten zeigen, dass Bildschirme sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Leuchtdichtebereichen eine konsistente und klare Wahrnehmung ermöglichen. Ihre stabilen und ausgeprägten Differenzen im Helligkeitskontrast machen sie in Bezug auf die Kontrastdarstellung eindeutig überlegen. Beim E-Papier hingegen zeigt sich, dass homogene Beleuchtung, insbesondere im niedrigen Leuchtdichtebereich, die geringsten Kontrastunterschiede hervorruft, was auf wahrnehmungstechnische Einschränkungen hinweist. Diese Einschränkungen sind bei E-Papier stärker ausgeprägt als bei Bildschirmen, insbesondere unter vergrößerter und homogener Beleuchtungsbedingungen.

Im Vergleich dazu erweist sich die gelbe Beleuchtung als die beste Beleuchtungsbedingung für E-Papier, da sie bei beiden Leuchtdichtebereichen den stärksten Kontrasteffekt erzielt und somit die Wahrnehmung optimiert. Die vergrößerte Beleuchtung, die eine größere Beleuchtungsfläche umfasst, zeigt Ergebnisse, die in Bezug auf die Wahrnehmungsqualität zwischen den Bedingungen homogener und gelber Beleuchtung liegen, jedoch mit einer höheren Variabilität. Dies deutet darauf hin, dass die Ausdehnung der Beleuchtungsfläche die Wahrnehmung stabilisieren kann, jedoch nicht so effektiv wie die gelbe Beleuchtung.

Der Einfluss der Leuchtdichte auf die Wahrnehmung des Helligkeitskontrastes zeigt sich insbesondere im niedrigen Leuchtdichtebereich, wo die Differenzen in den PSE-Werten insgesamt reduziert werden. Dies erschwert die Kontrastwahrnehmung unter schwachen Lichtbedingungen. Während Bildschirme auch bei geringer Leuchtdichte stabile Ergebnisse liefern, wird E-Papier durch die niedrige Leuchtdichte stärker beeinträchtigt. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit, die Beleuchtungsbedingungen für E-Papier-Anwendungen zu optimieren, insbesondere wenn niedrige Leuchtdichtebereiche vorherrschen. Dass sich die Magnitude der Ergebnisse zwischen Bildschirm und E-Papier bei homogener Beleuchtung bei hohen Leuchtdichtebereichen stärker ähneln, während der Bildschirm bei niedrigeren Leuchtdichtebereichen etwas bessere Ergebnisse liefert, deutet darauf hin, dass die unterschiedlichen Leuchtdichtebereiche zwischen den Experimenten von (Agostini und Bruno, 1996) und (Park, 2024) die in der Problemstellung ([Unterabschnitt 1.3](#)) erläuterten Unterschiede erklären könnten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Bildschirme bei niedrigen Leuchtdichtebereichen etwas überlegen sind, während E-Papier stark von den Beleuchtungsbedingungen abhängig ist. Bei höheren Leuchtdichtebereichen zeigt sich hingegen, dass die Größe des Helligkeitskontrasteffekts zwischen beiden Anzeigeformen vergleichbar ist und das E-Papier bei gelber Beleuchtung sogar überlegen sein kann.

Die Hypothese lässt sich somit weder vollständig bestätigen noch widerlegen. Wie vorhergesagt, zeigt das E-Papier bei gelber Beleuchtung unabhängig vom Leuchtdichtebereich ähnliche und teilweise sogar bessere Ergebnisse als der Bildschirm. Allerdings waren die Ergebnisse des E-Papiers bei homogener Beleuchtung nicht signifikant niedriger als die des Bildschirms, wie ursprünglich erwartet. Dies könnte jedoch daran liegen, dass die homogene Beleuchtung nicht den gesamten Raum ausfüllte, da dies mit der Nutzung eines Beamers nicht vollständig umsetzbar war. Die Beleuchtung spielt somit eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit von E-Papier.

4.2 Beschränkungen

Die vorliegende Arbeit weist einige Einschränkungen auf. Basierend auf den gesammelten Daten lässt sich feststellen, dass die Werte der Reflexionsgrade und Leuchtdichten der Probe suboptimal waren. Dies führte dazu, dass einige psychometrische Funktionen nicht vollständig berechnet werden konnten und daher eingeschätzt werden mussten ([Abb. 25](#)). Für eine bessere Darstellung der Funktionen wären höhere Extremwerte erforderlich gewesen. Hier stieß man jedoch, wie bereits erwähnt, auf eine technische Grenze des E-Papiers: Mit einer Farbtiefe von 2^4 Bits konnten Reflexionsgrade nahe 0 und 1 nicht mehr als Graustufen dargestellt werden, sondern wurden als Schwarz bzw. Weiß angezeigt, wodurch die Quadrate nicht mehr vom Hintergrund unterscheidbar waren. Der Bildschirm mit seiner deutlich höheren Farbtiefe (2^{16} Bits) hätte dieses Problem umgehen können. Ein solcher Ansatz hätte jedoch dazu geführt, dass die Anzeigeformen unter unterschiedlichen Bedingungen verglichen worden wären, was die Ergebnisse nicht repräsentativ gemacht hätte.

Eine weitere Problematik stellte die Beleuchtung beim E-Papier dar. Da die Oberfläche das Licht des Beamers reflektierte, musste die Beleuchtung mehrfach angepasst werden, um verfälschte Ergebnisse zu vermeiden. Zudem wichen die gemessenen Leuchtdichten zwischen der oberen und unteren Seite der Oberflächen geringfügig ab. Beim E-Papier war die obere Seite der Oberfläche etwas heller, während dies beim Bildschirm

umgekehrt war. Da die Quadrate jedoch in der Mitte der Anzeigen dargestellt wurden, war dieses Problem für die gewählten Reizbilder weniger relevant. Dennoch wurde stets der Durchschnitt der gemessenen Werte verwendet, um mögliche Effekte auszugleichen. Diese Problematik sollte jedoch bei zukünftigen Experimenten berücksichtigt werden.

Ein weiterer Punkt betrifft die Durchführung des Experiments mit E-Papier. Laut Rückmeldungen der Probanden wurde dieses Experiment als anstrengender empfunden als das mit dem Bildschirm. Dies lag daran, dass der Wechsel zwischen den Reizbildern auf dem E-Papier langsamer erfolgte und das ständige Einblenden von leeren weißen und grauen Bildern zwischen den Reizbildern auf Dauer ermüdend für die Augen war. Diese Maßnahmen waren jedoch notwendig, um sogenannte „Phantom-Überreste“ des vorherigen Bildes zu löschen.

Die meisten dieser Probleme dürften sich mit der Weiterentwicklung der Technologie des elektronischen Papiers beheben lassen.

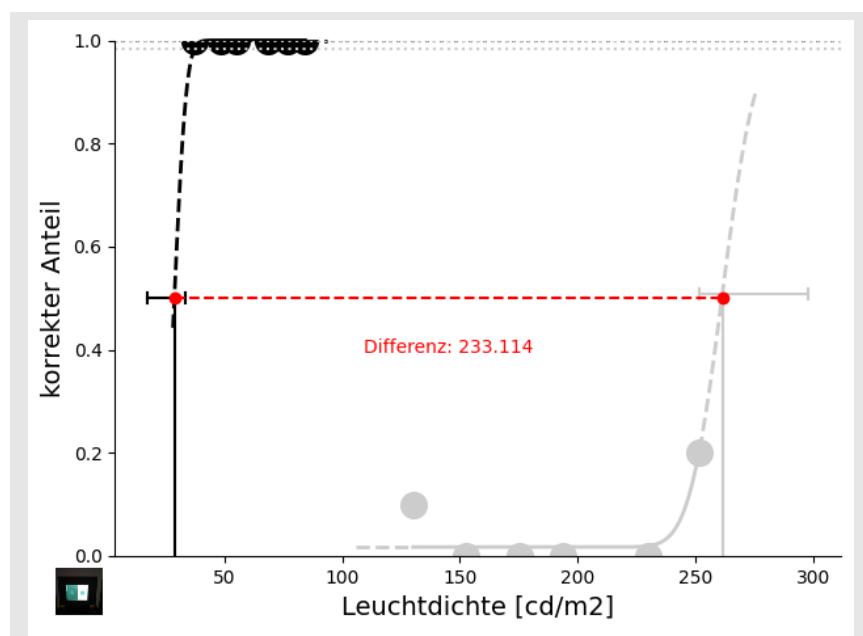


Abbildung 25: psychometrische Funktion eines Probanden

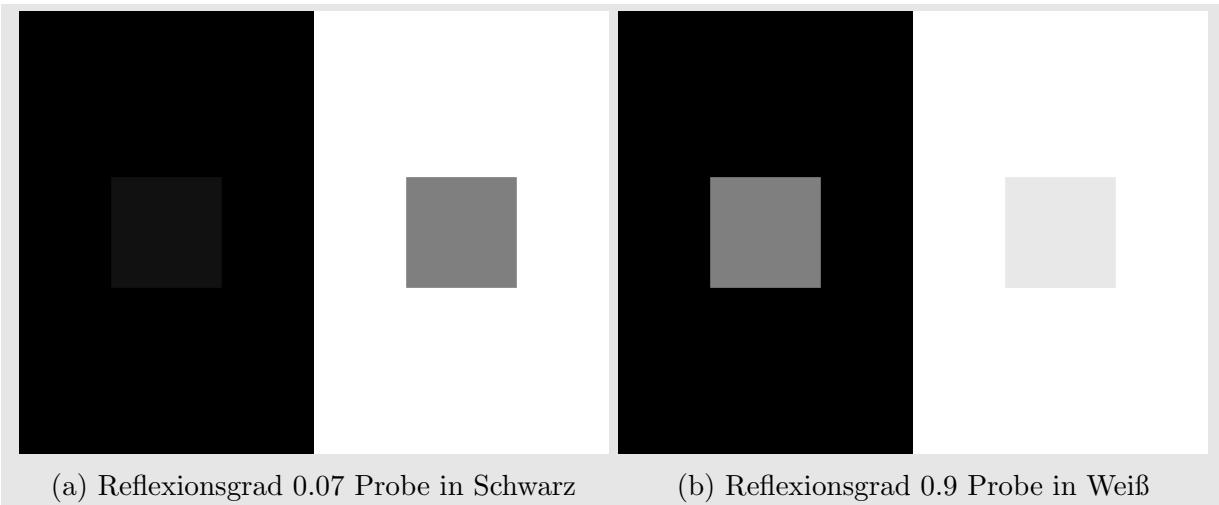
4.3 Ausblick und Offene Fragen

Für zukünftige Schritte und um mit Sicherheit festzustellen, ob es einen relevanten Unterschied zwischen Bildschirm und E-Papier unter allen Bedingungen gibt, ist die Durchführung eines ANOVA-Tests erforderlich. Dieser Test ermöglicht es, Unterschiede zwischen den Mittelwerten mehrerer Gruppen (z.B. Bildschirm und E-Papier unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen) zu untersuchen. ANOVA prüft, ob die Unterschiede zwischen den Gruppen signifikant sind, indem es die Variation zwischen den Gruppen mit der Variation innerhalb der Gruppen vergleicht.

Falls der ANOVA-Test signifikante Unterschiede aufzeigt, aber keine spezifischen Aussagen darüber trifft, welche Gruppen sich genau unterscheiden, wäre eine post-hoc-Analyse notwendig. Eine solche Analyse, beispielsweise ein T-Test, würde es ermöglichen, Paarvergleiche zwischen spezifischen Bedingungen (z.B. Bildschirm vs. E-Papier bei homogener Beleuchtung) durchzuführen, um festzustellen, welche Gruppenpaare sich

signifikant unterscheiden. Diese Methode gewährleistet, dass alle relevanten Paarvergleiche berücksichtigt werden, und liefert genauere Schlussfolgerungen über die Unterschiede zwischen den Anzeigeformen.

Um jedoch präzisere psychometrische Funktionen und damit genauere Ergebnisse zu erhalten, sollten die Reflexionsgrade und Leuchtdichten so angepasst werden, dass Graustufen verwendet werden können, die näher an Schwarz und Weiß liegen. Dabei muss jedoch zukünftig berücksichtigt werden, dass Werte, die sehr nahe bei 0 oder 1 liegen (Abb. 26), von 7 der 8 Probanden in dieser Arbeit als problematisch empfunden wurden. In solchen Fällen, bei denen Hintergrund und Quadrat ähnliche Helligkeiten hatten, berichteten viele Probanden von einem Eindruck von Transparenz, was die Entscheidung darüber, welches Quadrat heller war, erschwerte. Hier wurde den Probanden geraten, das Quadrat zu wählen, das heller erschien, und nicht das, das deutlicher sichtbar war. Es bleibt jedoch eine offene Frage, ob bei noch extremeren Werten nahe 0 und 1 dieser Transparenzeffekt stärker auftritt und die Ergebnisse beeinflusst.



(a) Reflexionsgrad 0.07 Probe in Schwarz (b) Reflexionsgrad 0.9 Probe in Weiß

Abbildung 26: SBC Reizbild mit kleinsten und größten Reflexionsgrad

Aus der Magnitude des Effekts war deutlich ersichtlich, dass die Verteilung der Leuchtdichten außerhalb des eigentlichen Reizbildes die Magnitude des Helligkeitskontrasteffekts beeinflusst. Es bleibt jedoch eine weitere offene Frage, wie stark diese Korrelation tatsächlich ist und ob ab einer bestimmten Größe der Beleuchtungsfläche außerhalb des Bildes der Helligkeitskontrasteffekt nicht mehr beeinflusst wird.

5 Literatur

Literatur

- Agostini, T., & Bruno, N. (1996). Lightness contrast in CRT and paper-and-illuminant displays. *Perception and Psychophysics*, 58, 250–258. <https://doi.org/10.3758/BF03211878>
- Bruno, N. (1994). Failures of lightness constancy, edge integration, and local edge enhancement. *Vision Research*, 34, 2205–2214.
- GIBBS, T., & LAWSON, R. (1974). Simultaneous brightness contrast in stereoscopic space. *Vision Research*, 14, 983–987.
- GILCHRIST, A. (1988). Lightness contrast and failures of constancy: A common explanation. *Perception and Psychophysics*, 43, 415–424.
- GILCHRIST, A., DELMAN, S., & JACOBSEN, A. (1983). The classification and integration of edges as critical to the perception of reflectance and illumination. *Perception and Psychophysics*, 33, 425–436.
- Park, J. (2024). Vergleich zwischen E-Papier und Bildschirm als Anzeigeform von optischen Reizen. *vorherige Bachelorarbeit TU Berlin*.
- Weigand, C. (2009). Zentraler Grenzwertsatz. In: Statistik mit und ohne Zufall. *Physik-Lehrbuch*. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2347-9_11
- WHITE, M. (1981). The effect of the nature of the surround on the perceived lightness of gray bars within square-wave test gratings. *Perception*, 10, 215–230.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1	Simultanen Helligkeitskontrast. Das Quadrat im schwarzen Hintergrund erscheint heller als das im weißen, obwohl beide Figuren die gleiche Graustufe haben	9
2	Abbildungen aus der Arbeit (Park, 2024).	10
a	Reizbilder in der Arbeit	10
b	Experiment mit dem E-Papier	10
c	Experiment mit dem Bildschirm	10
3	Abbildung aus der Arbeit (Park, 2024) Tab. 5.7 und Abb. 6.4	11
a	SBC: Die Magnitude des Effektes auf zwei Anzeigeformen und Differenz	11
b	Vergleich des 95% Konfidenzintervalls eines Probanden zwischen zwei Anzeigenformen	11
4	Abbildung aus der Arbeit (Park, 2024) Abb. 6.1.	12
a	E-Papier, Target in Weiß, Probe in Schwarz	12
b	Bildschirm, Target in Weiß, Probe in Schwarz	12
c	E-Papier, Target in Schwarz, Probe in Weiß	12
d	Bildschirm, Target in Schwarz, Probe in Weiß	12
5	Abbildung aus der Arbeit (Agostini und Bruno, 1996). Experiment 1: Reizbild für die Experimente. Die Rechtecke auf der rechten Seite wurden so aufgeteilt, dass sie alle Graustufen der Munsell-Skala zwischen Schwarz und Weiß repräsentieren.	13
6	Abbildung aus der Arbeit (Agostini und Bruno, 1996). Ergebnisse des ersten Experiments: Auf der linken Seite stehen die Ergebnisse, die auf dem Bildschirm gemessen wurden, und auf der rechten Seite die des Papier-Anzeige.	14
7	Von mir erstellt zur Veranschaulichung der Beleuchtungsformen in Experiment 1 und 2 von (Agostini und Bruno, 1996)	15
a	Gelbe-Beleuchtung	15
b	Vergrößerte Beleuchtung	15
c	Homogene Beleuchtung	15
8	Abbildung aus der Arbeit(Agostini und Bruno, 1996). Ergebnisse aus dem zweiten Experiment	15
9	Abbildung aus der Arbeit (Park, 2024) Tab. 5.7 und 5.8.	17
a	SBC: Die Magnitude des Effektes auf zwei Anzeigeformen und Differenz	17
b	White: Die Magnitude des Effektes auf zwei Anzeigeformen und Differenz	17
10	Grundlegender simultaner Helligkeitskontrast. Beide Quadrate haben einen Reflexionsgrad von 0.5.	18
11	Einrichtung für die Versuche mit dem E-Papier als Anzeigeform	20
a	Seitenansicht	20
b	Vorderansicht	20

12	Einrichtung für die Versuche mit dem Bildschirm als Anzeigeform	21
a	Seitenansicht	21
b	Vorderansicht	21
13	LUT des Bildschirms vom 26.08.24. Es stammt aus dem Exemplar von HRL	23
14	(a) Gemessene Leuchtdichte aus (Park, 2024) Tabelle 5.1 (b) Gemessene Leuchtdichte aus (Agostini und Bruno, 1996) Experiment 1	23
a	23
b	23
15	Beispielbild des Experiments auf dem Bildschirm. Abb. 15a zeigt das Experiment bei hoher Leuchtdichtebereich, während Abb. 15b es bei niedriger Leuchtdichtebereich darstellt.	25
a	25
b	25
16	Beispielbild des Experiments auf dem E-Papier. Abb. 16a bis Abb. 16c zeigen das Experiment bei hoher Leuchtdichtebereich, während Abb. 16d bis Abb. 16f es bei niedriger Leuchtdichtebereich darstellen. Alle Bilder einer Reihe entsprechen die verschiedene Beleuchtungen	26
a	homogen	26
b	vergrößert	26
c	gelb	26
d	homogen	26
e	vergrößert	26
f	gelb	26
17	Symbole zur Kennzeichnung der Anzeigeform und Beleuchtungsbedingung	28
a	Bildschirm	28
b	E-Papier _{gelb}	28
c	E-Papier _{vergroeßert}	28
d	E-Papier _{homogen}	28
18	Proband: SH	29
19	Proband: GA	30
20	Proband: CP	31
21	Abb. 21a zeigt die Berechnung der Randdichte und deren Gauß-Approximation. Abb. 21b stellt die Berechnung des Konfidenzintervalls der Magnitude des Effekts dar.	37
a	37
b	37
22	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	40
a	Proband: SH	40
b	Proband: SH	40
23	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	41
a	Proband: GA	41
b	Proband: GA	41
24	Caption	43
a	43
b	43
25	psychometrische Funktion eines Probanden	46

26	SBC Reizbild mit kleinsten und größten Reflexionsgrad	47
a	Reflexionsgrad 0.07 Probe in Schwarz	47
b	Reflexionsgrad 0.9 Probe in Weiß	47
27	Proband: CP	53
28	Proband: KB	54
29	Proband: DC	55
30	Proband: GA	56
31	Proband: MI	57
32	Proband: OO	58
33	Proband: SH	59
34	Proband: YC	60
35	Proband: CP	61
36	Proband: KB	62
37	Proband: DC	63
38	Proband: GA	64
39	Proband: MI	65
40	Proband: OO	66
41	Proband: SH	67
42	Proband: YC	68
43	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	69
a	Proband: CP	69
b	Proband: CP	69
44	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	70
a	Proband: KB	70
b	Proband: KB	70
45	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	71
a	Proband: DC	71
b	Proband: DC	71
46	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	72
a	Proband: GA	72
b	Proband: GA	72
47	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	73
a	Proband: MI	73
b	Proband: MI	73
48	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	74
a	Proband: OO	74
b	Proband: OO	74
49	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	75
a	Proband: SH	75
b	Proband: SH	75
50	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	76
a	Proband: YC	76
b	Proband: YC	76

7 Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1	Leuchtdichte Messungen in cd/m^2	22
2	Mapping des Reflexionsgrads und Leuchtdichte von der Probereize in in cd/m^2	22
3	Leuchtdichte Messungen in cd/m^2	24
4	Mapping des Reflexionsgrads und Leuchtdichte von der Probe-Quadrat in cd/m^2	24
5	Neues Mapping des Reflexionsgrads und Leuchtdichte Probe-Quadrats .	32
6	PSE der Funktionen auf dem Bildschirm bei hoher Leuchtdichtebereich. PSE1 ist der Punkt subjektiver Gleichheit der schwarzen Funktionen, und PSE2 ist der der hellgrauen Funktionen.	34
7	PSE der Funktionen auf dem E-Papier unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen bei hoher Leuchtdichtebereich. PSE1 ist der Punkt subjektiver Gleichheit der schwarzen Funktionen, und PSE2 ist der der hellgrauen Funktionen.	34
8	PSE der Funktionen auf dem Bildschirm bei niedriger Leuchtdichtebereich. PSE1 ist der Punkt subjektiver Gleichheit der schwarzen Funktionen, und PSE2 ist der der hellgrauen Funktionen.	34
9	PSE der Funktionen auf dem E-Papier unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen bei niedriger Leuchtdichtebereich. PSE1 ist der Punkt subjektiver Gleichheit der schwarzen Funktionen, und PSE2 ist der der hellgrauen Funktionen.	35
10	Durchschnitt der Magnitude in cd/m^2	35
11	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	38
12	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	38
13	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	38
14	Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall	39

8 Anhang

8.1 Grafiken des Vergleich der Anzeige- und Beleuchtungsformen anhand der psychometrischen Funktionen

8.1.1 bei höherem Leuchtdichtenbereich

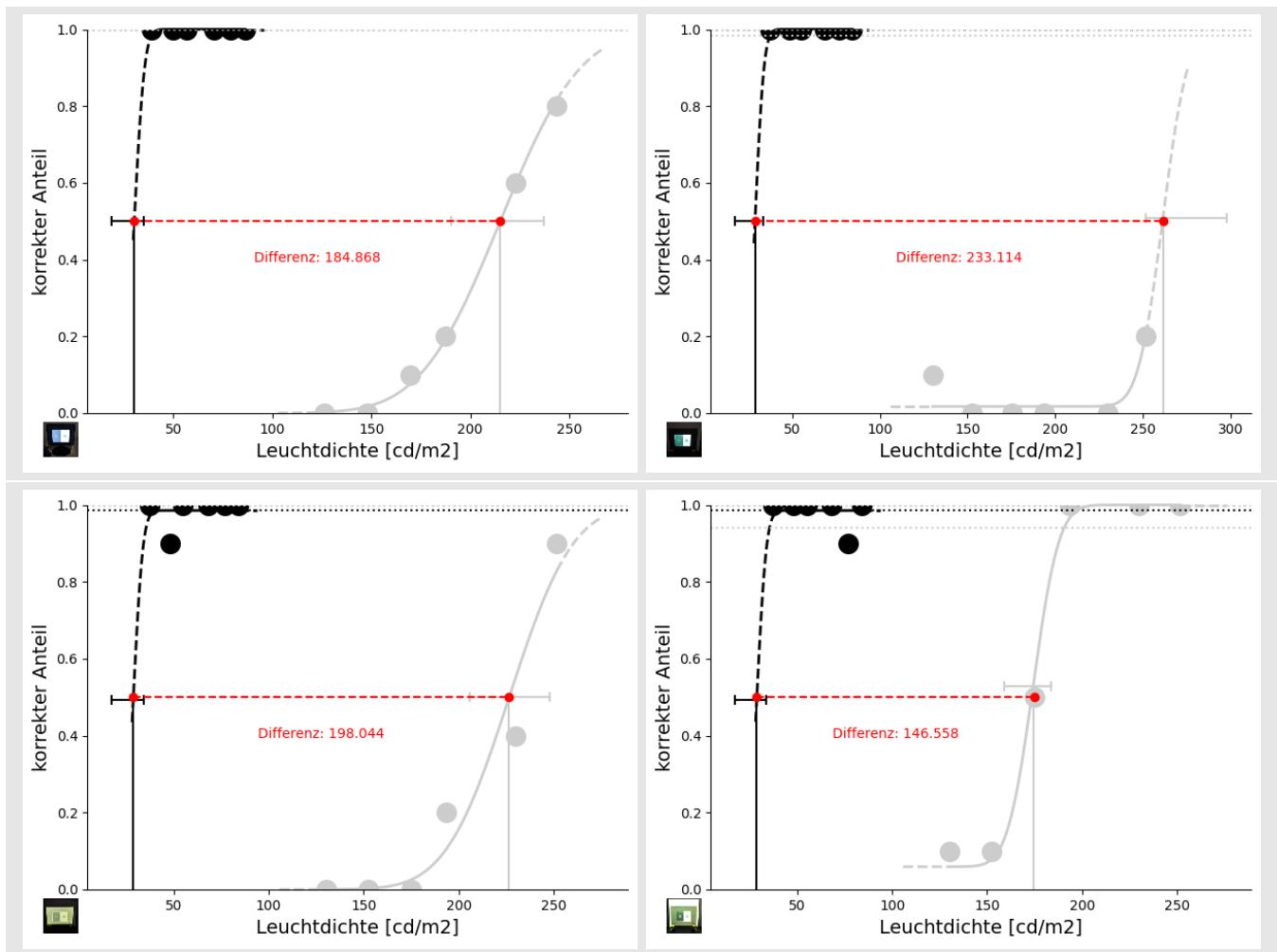


Abbildung 27: Proband: CP

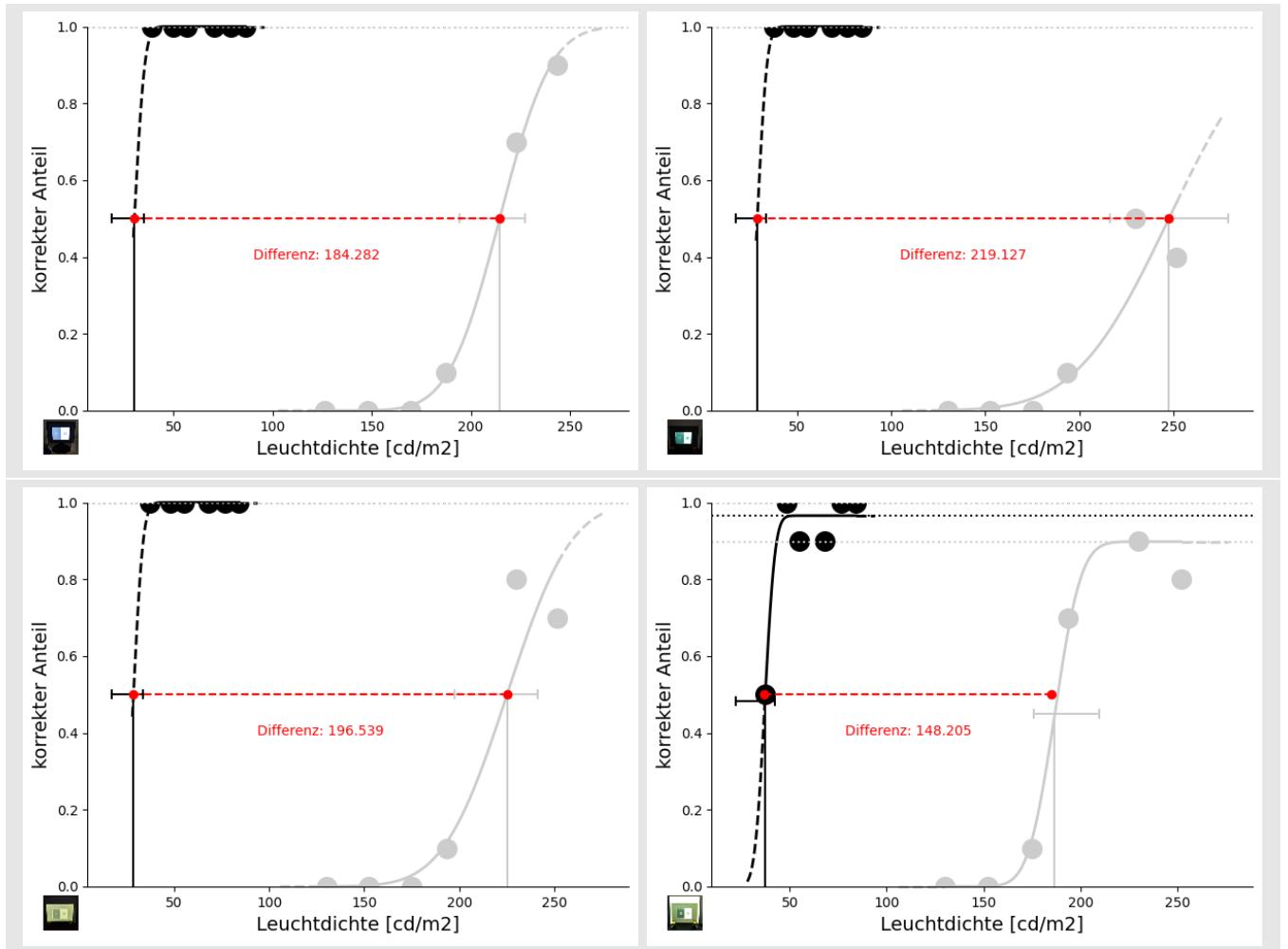


Abbildung 28: Proband: KB

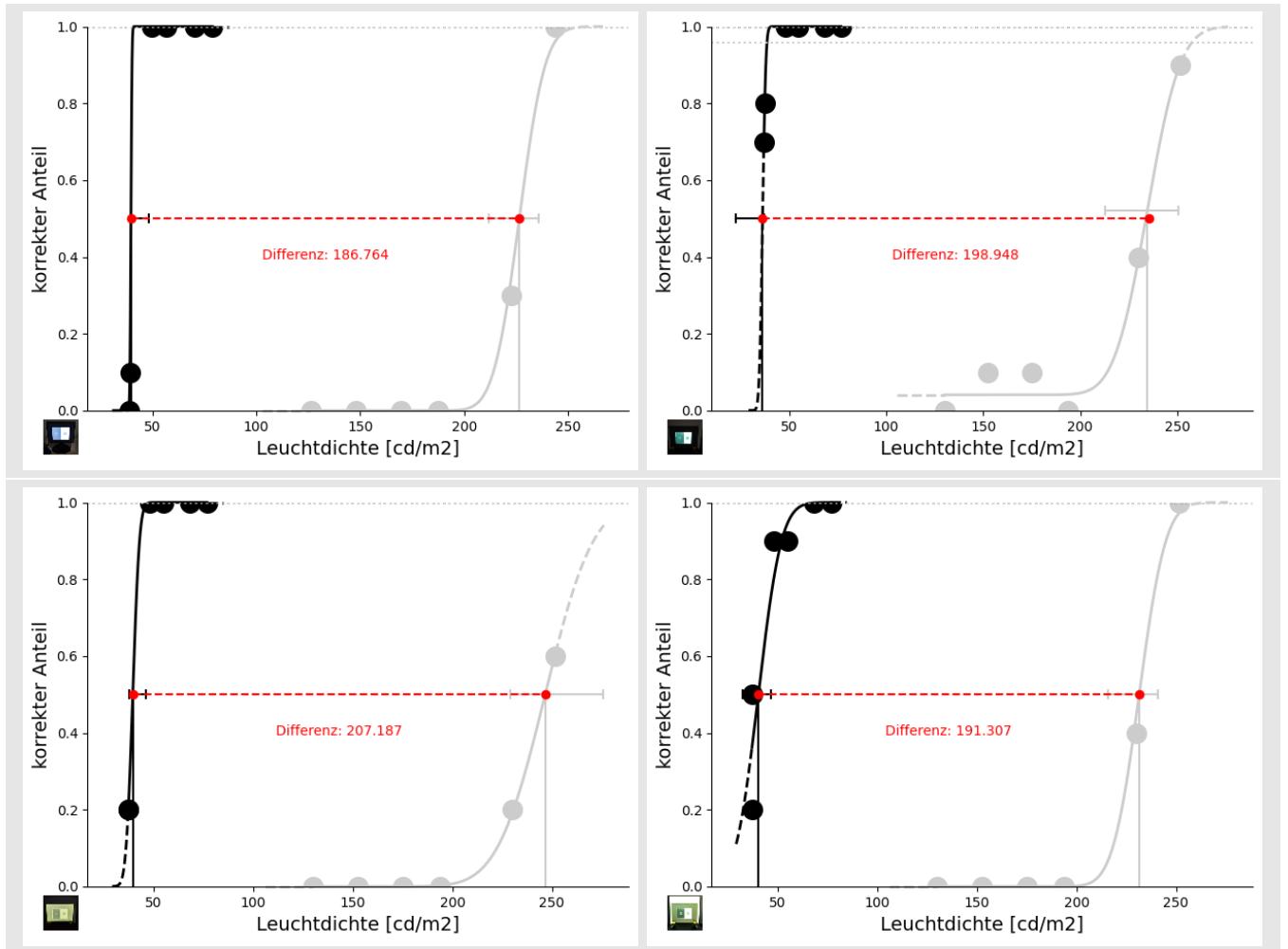


Abbildung 29: Proband: DC

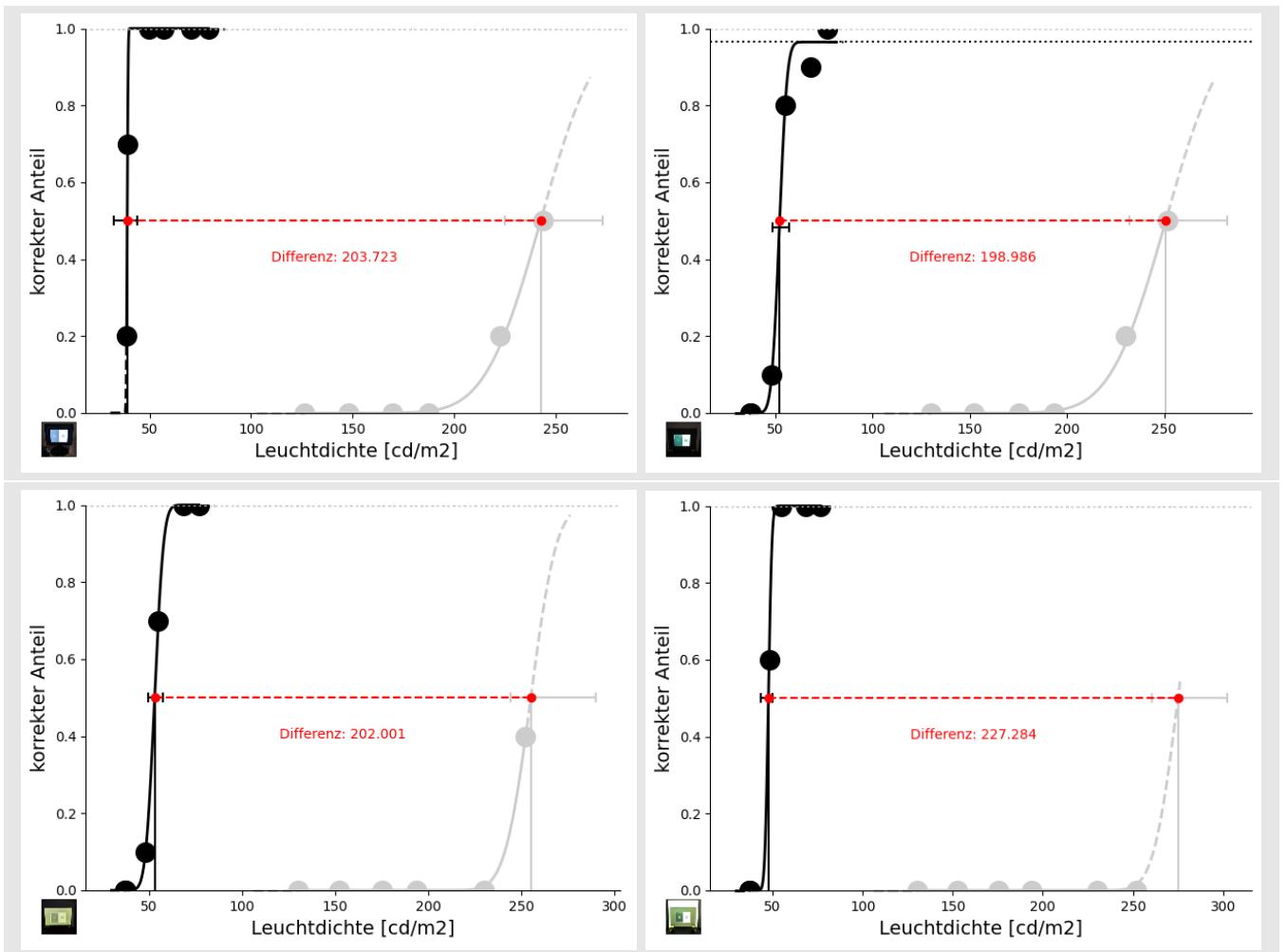


Abbildung 30: Proband: GA

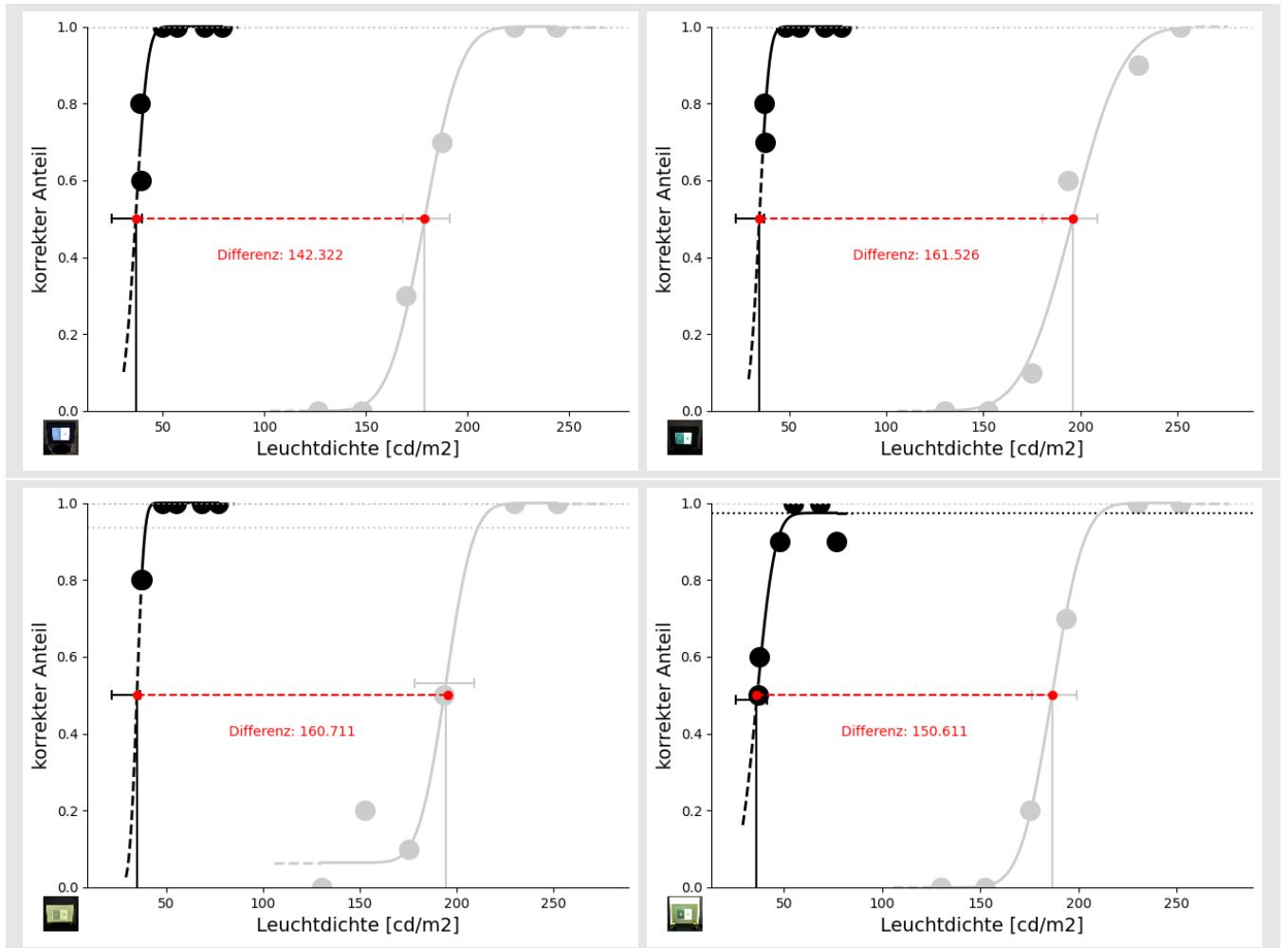


Abbildung 31: Proband: MI

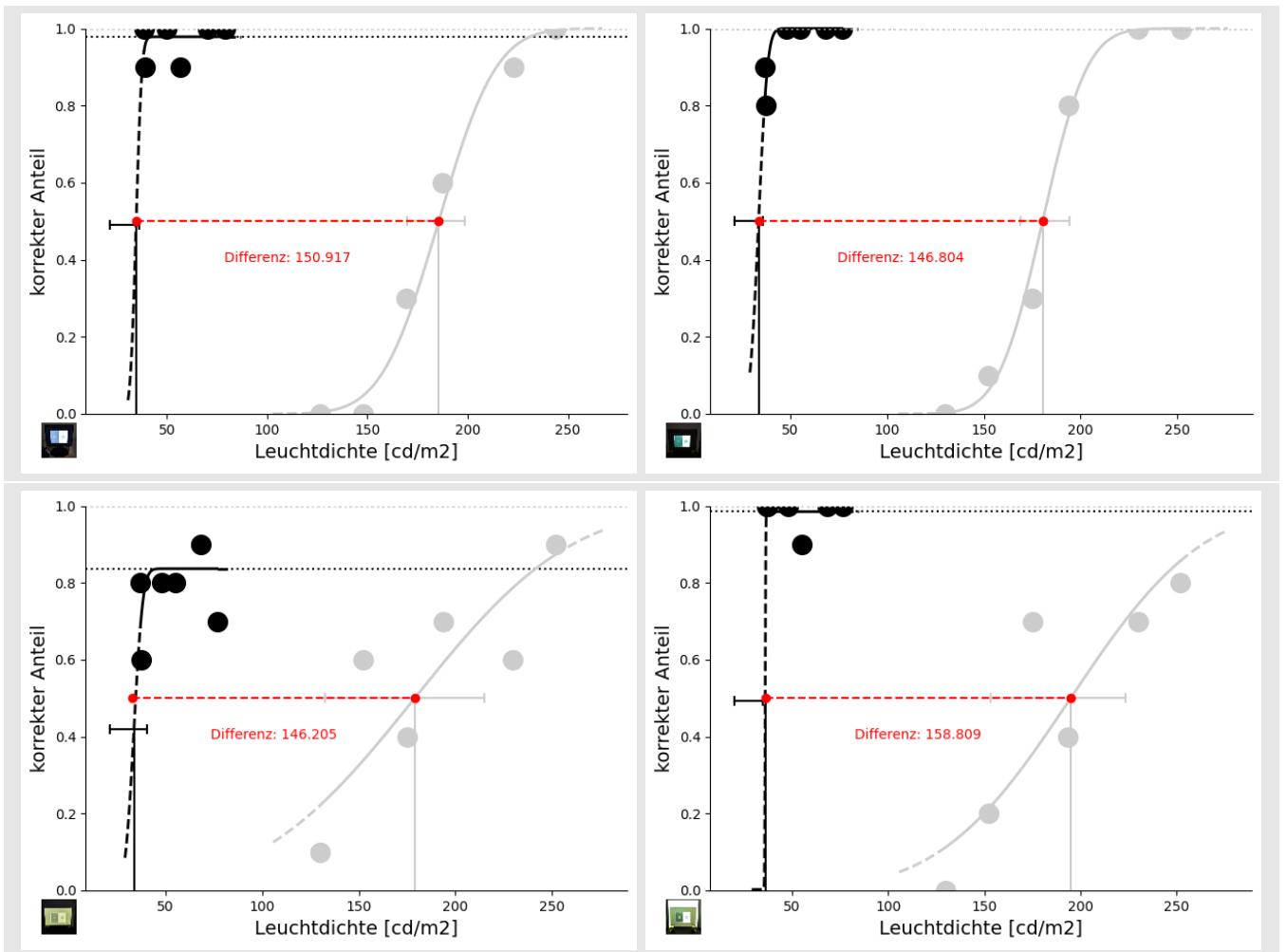


Abbildung 32: Proband: OO

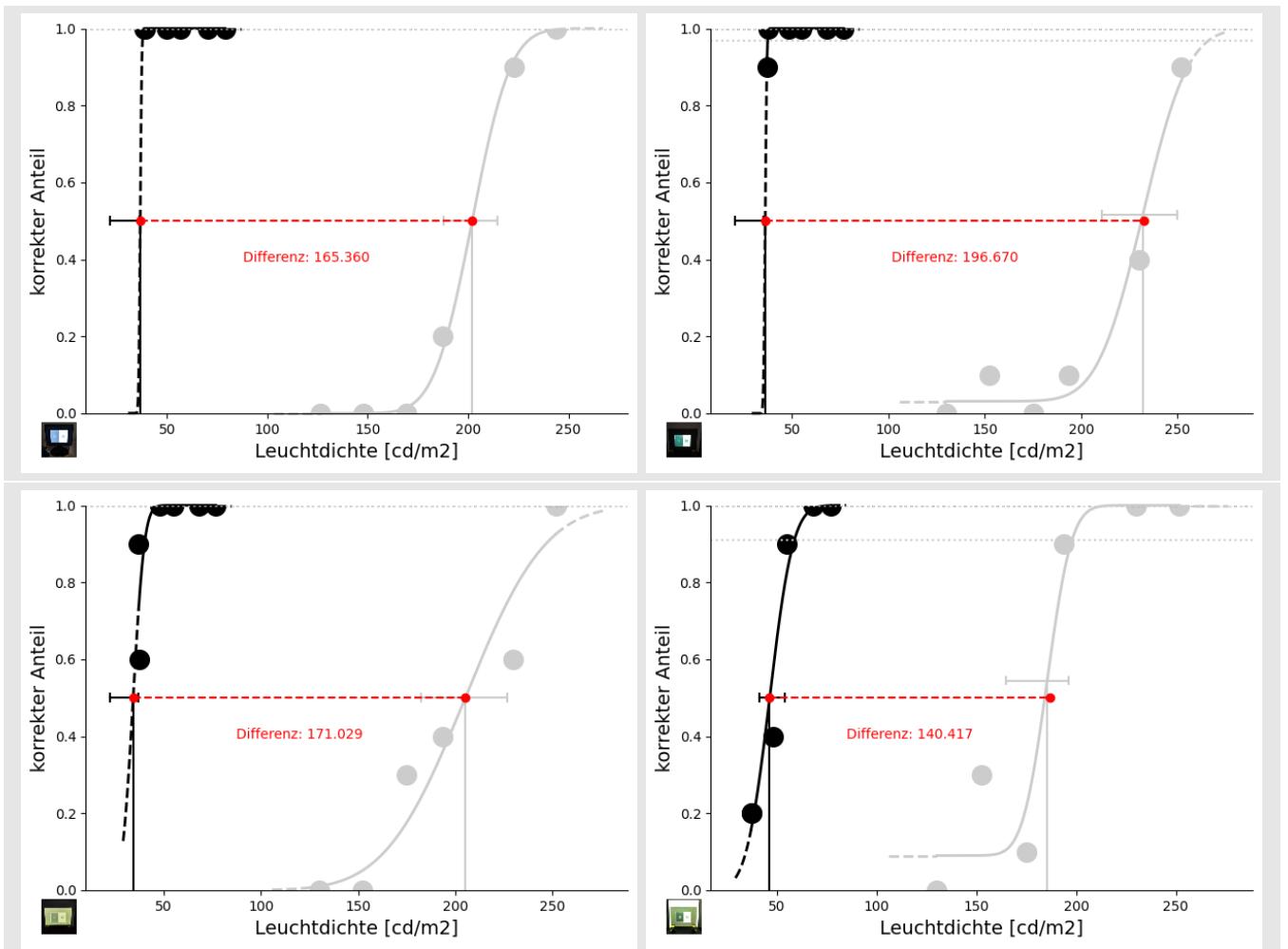


Abbildung 33: Proband: SH

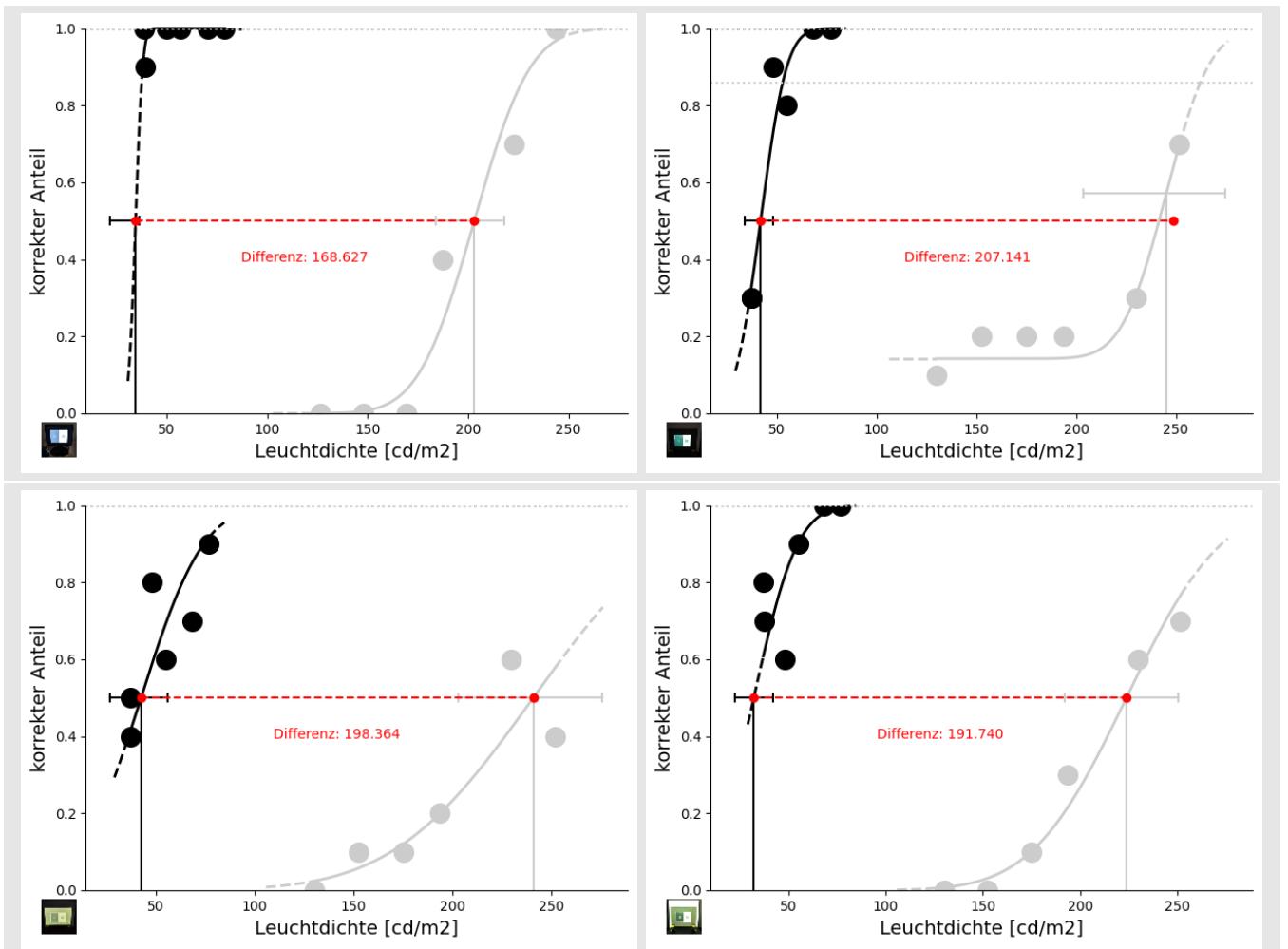


Abbildung 34: Proband: YC

8.1.2 bei reduziertem Leuchtdichtenbereich

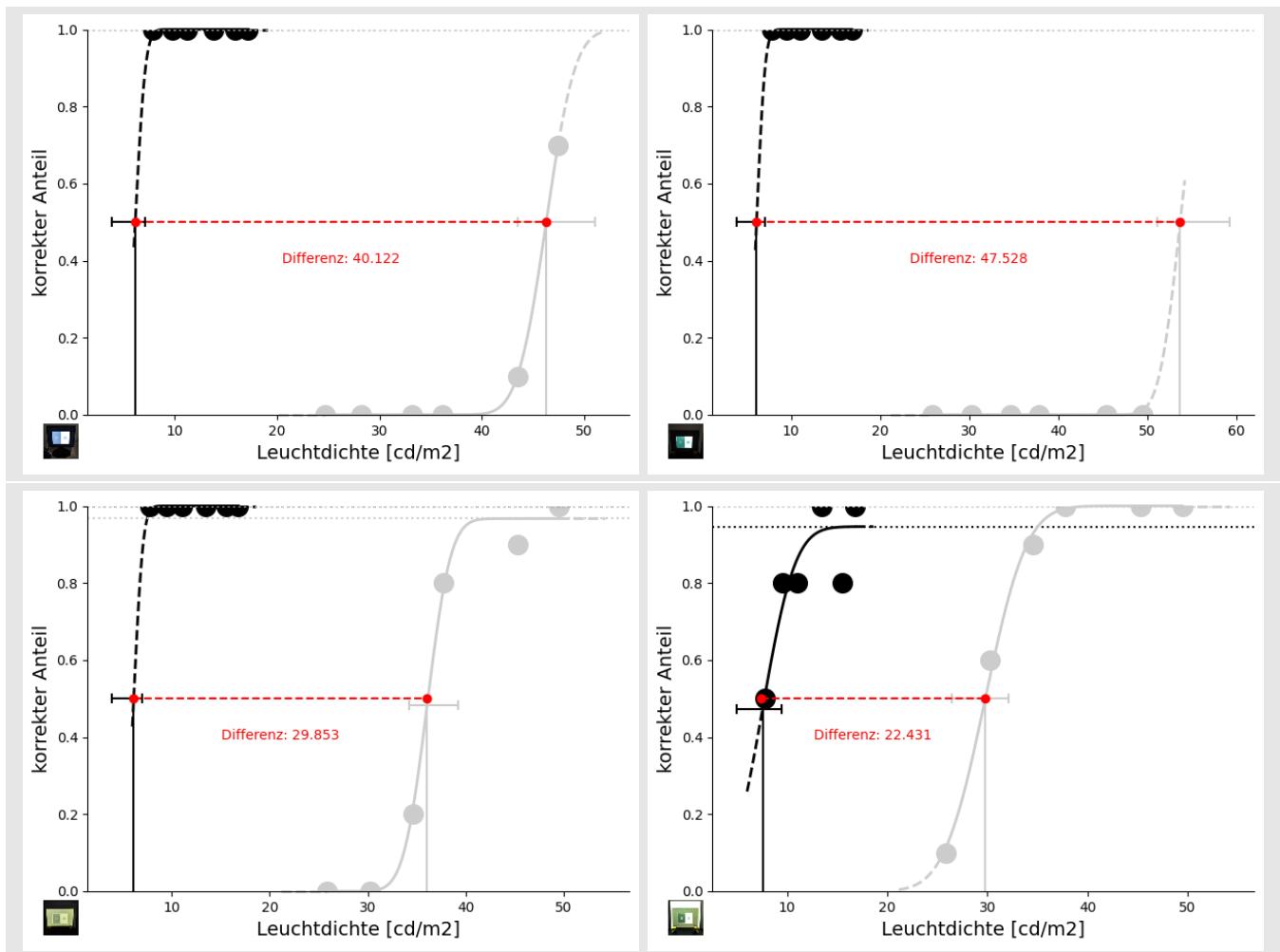


Abbildung 35: Proband: CP

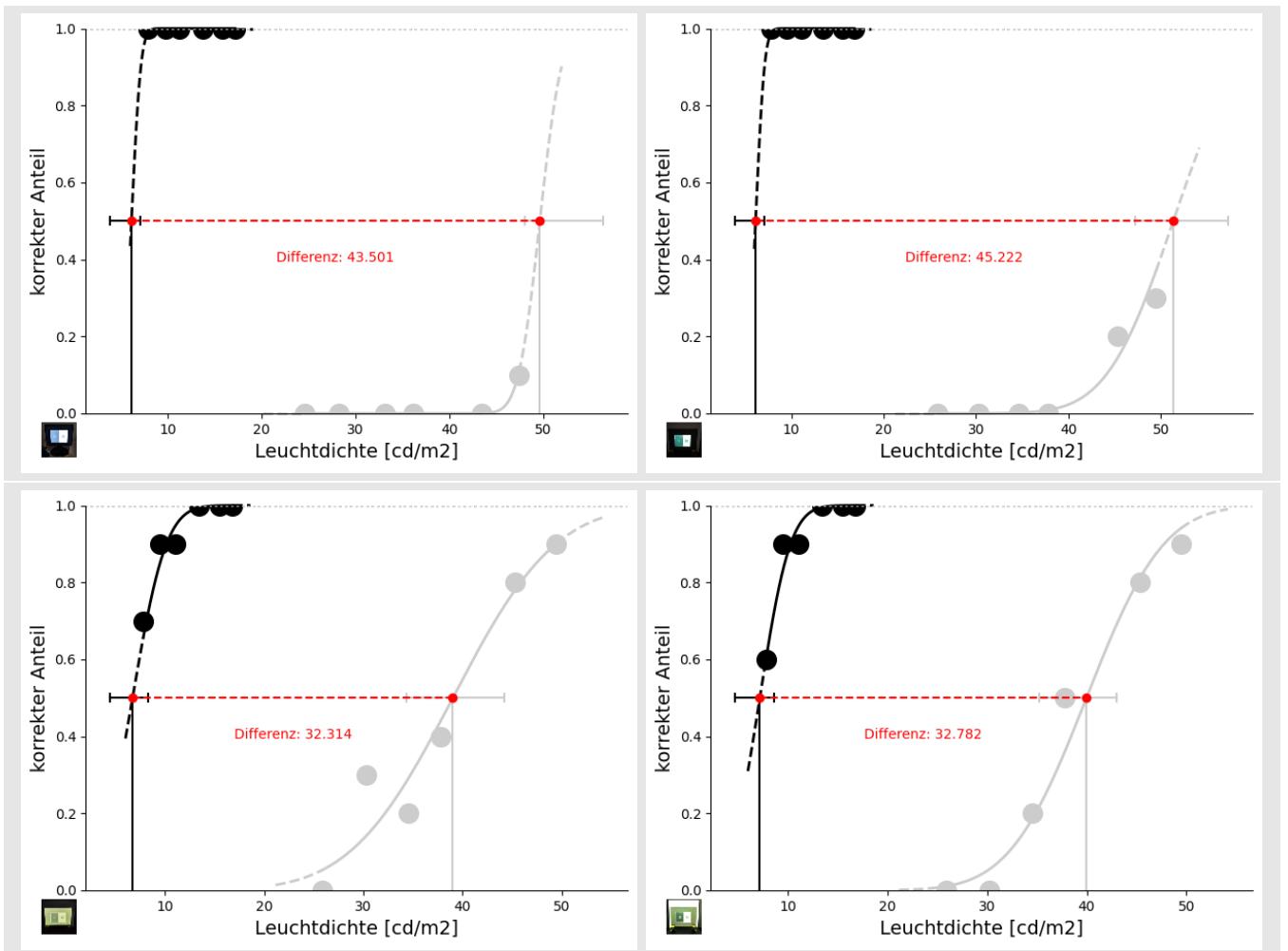


Abbildung 36: Proband: KB

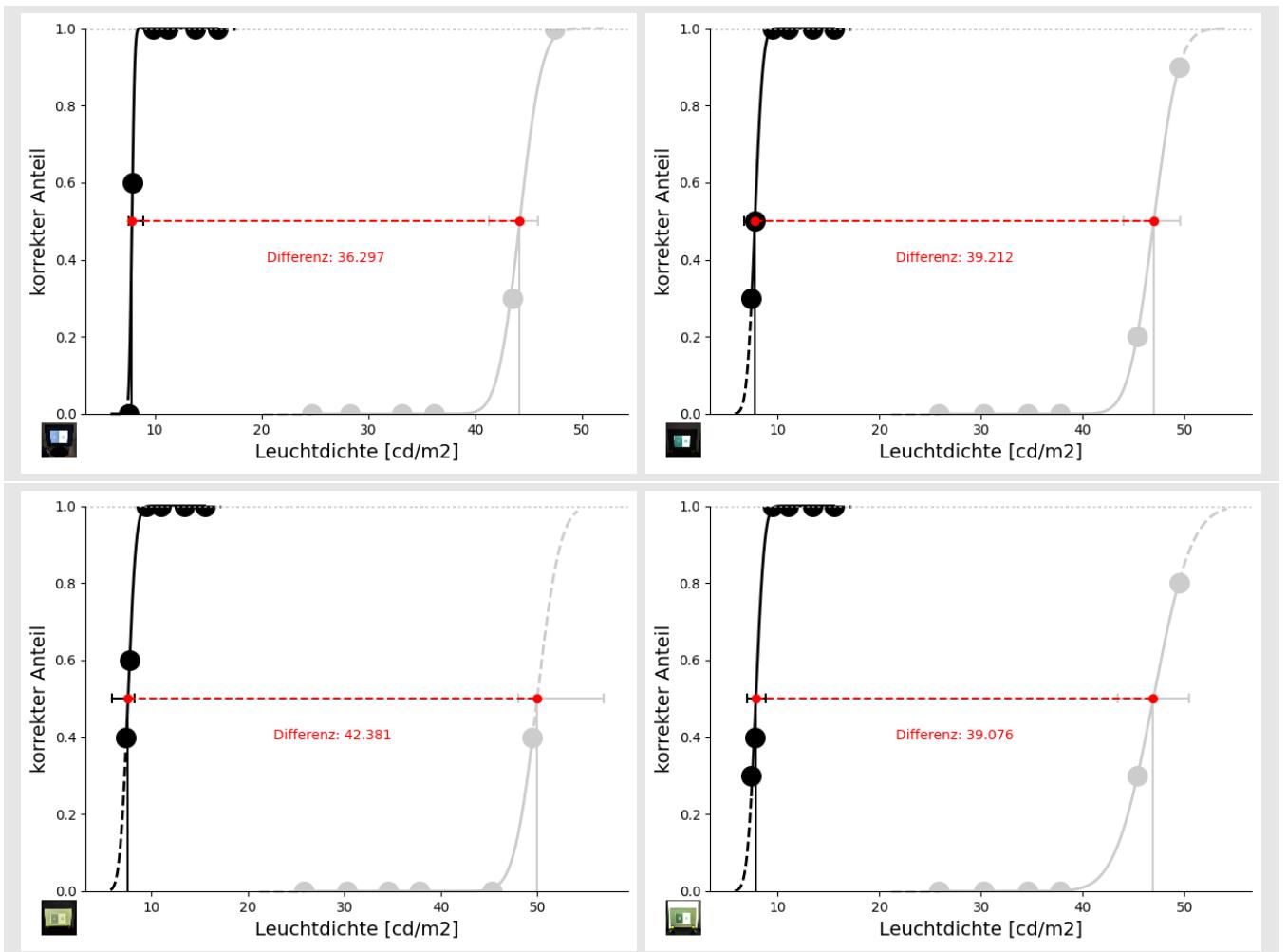


Abbildung 37: Proband: DC

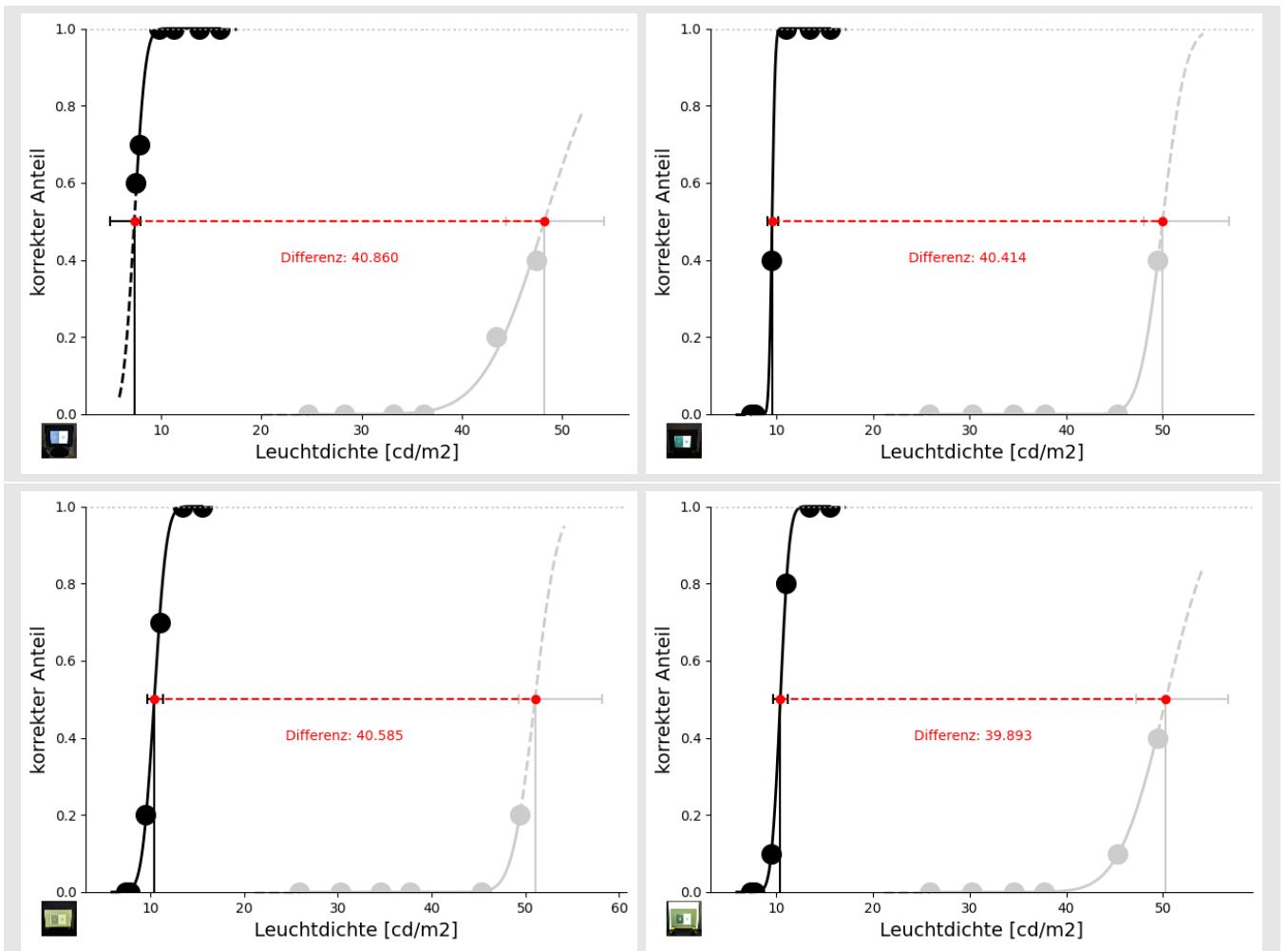


Abbildung 38: Proband: GA

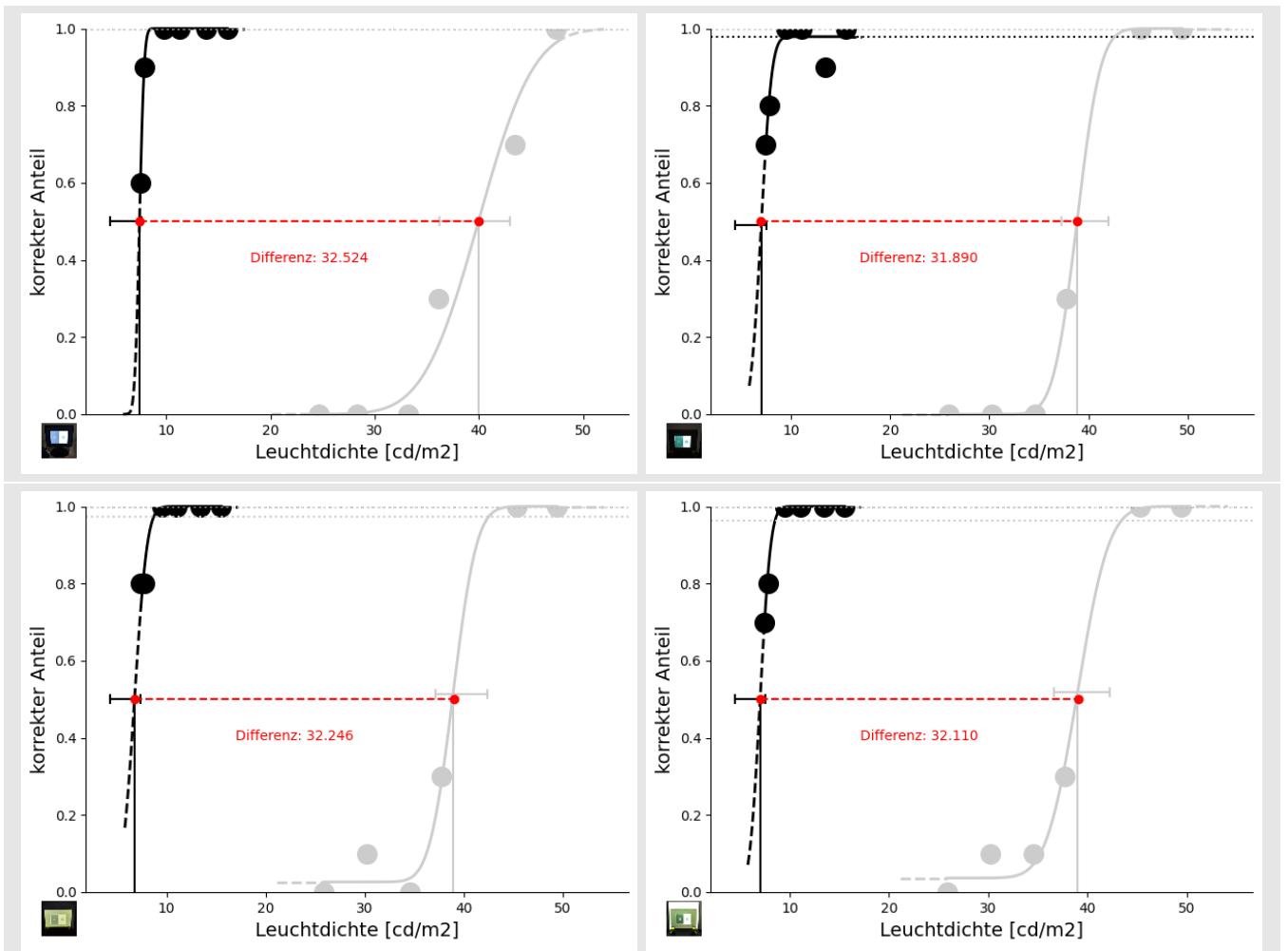


Abbildung 39: Proband: MI

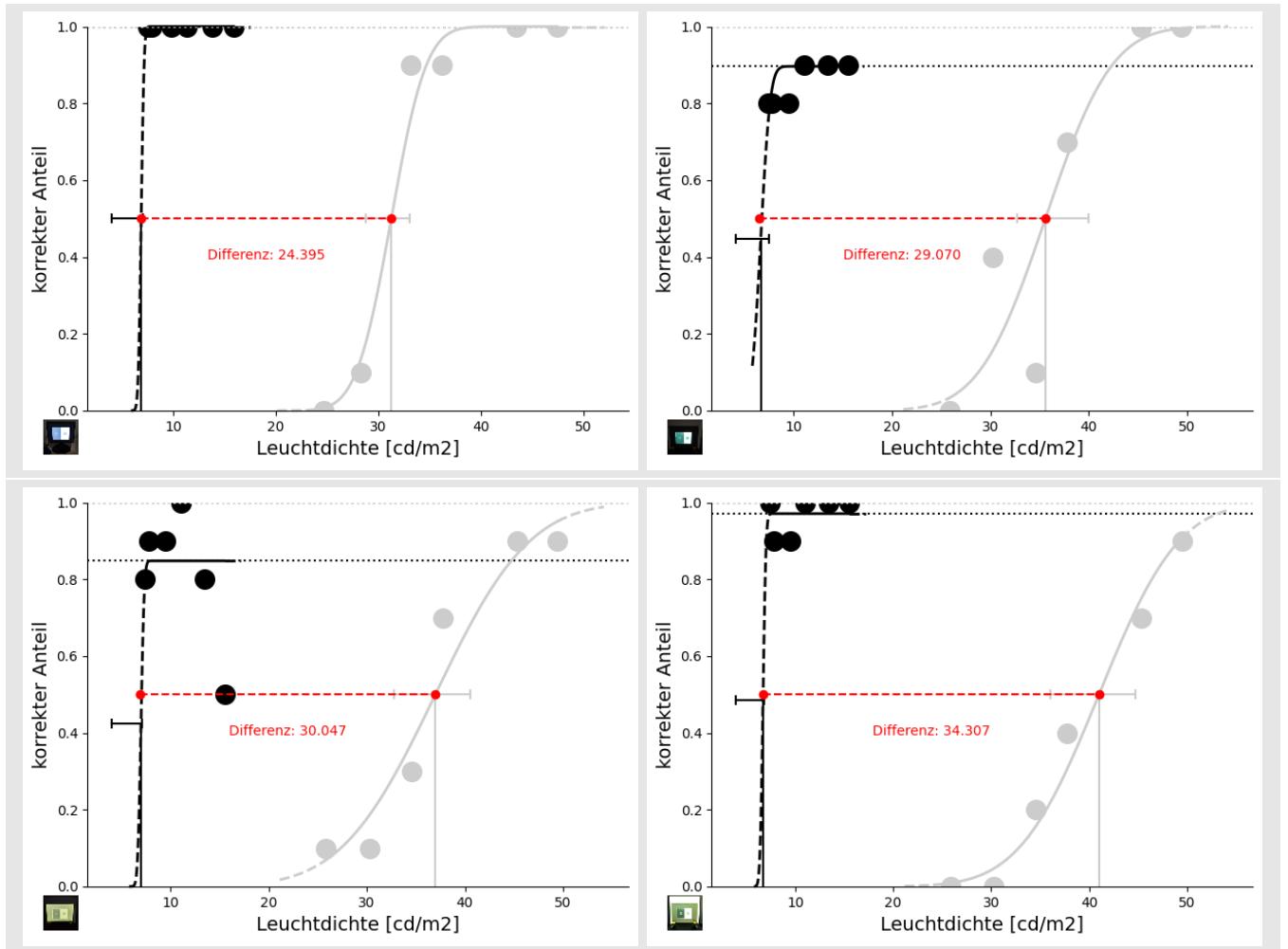


Abbildung 40: Proband: OO

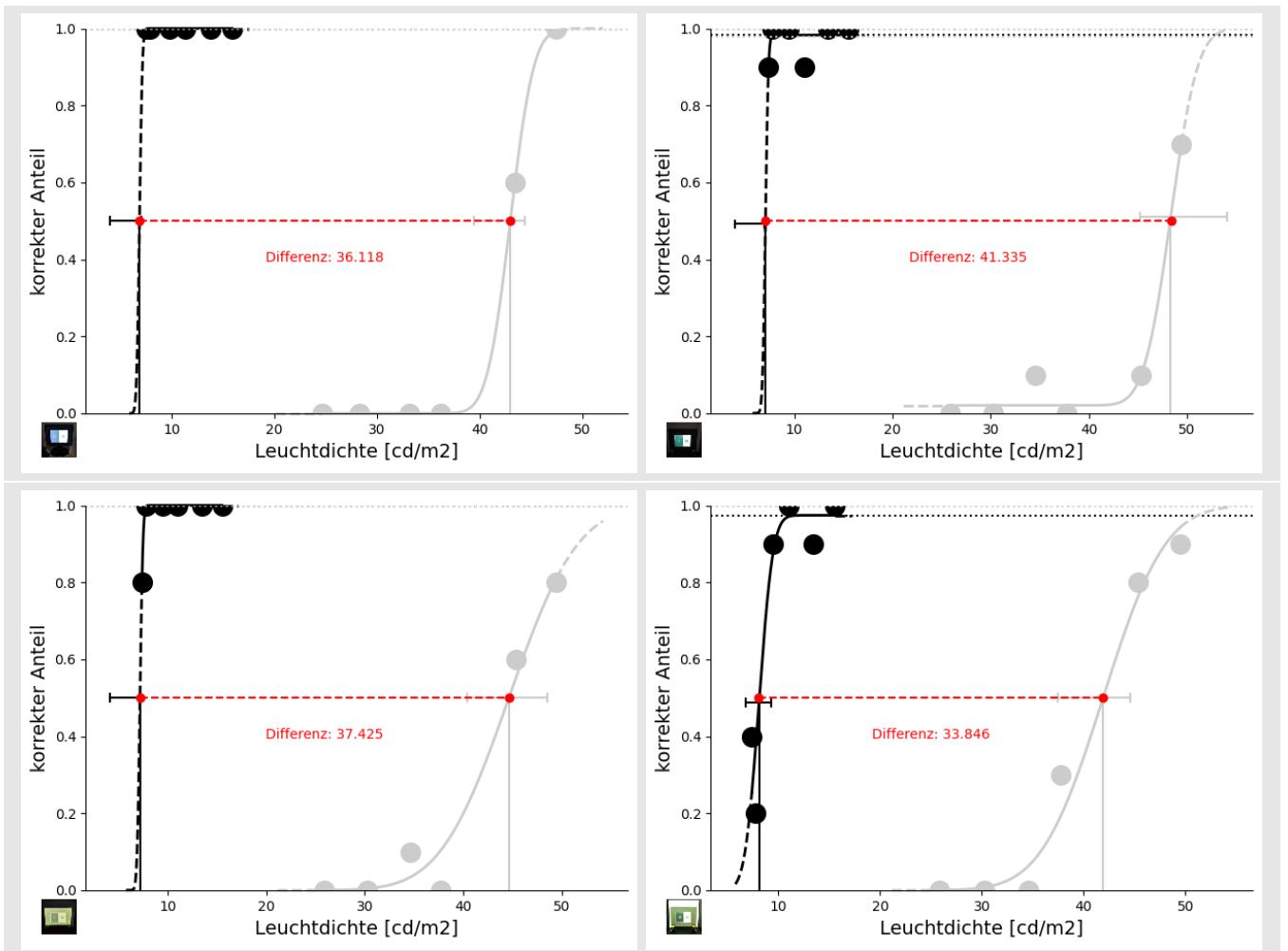


Abbildung 41: Proband: SH

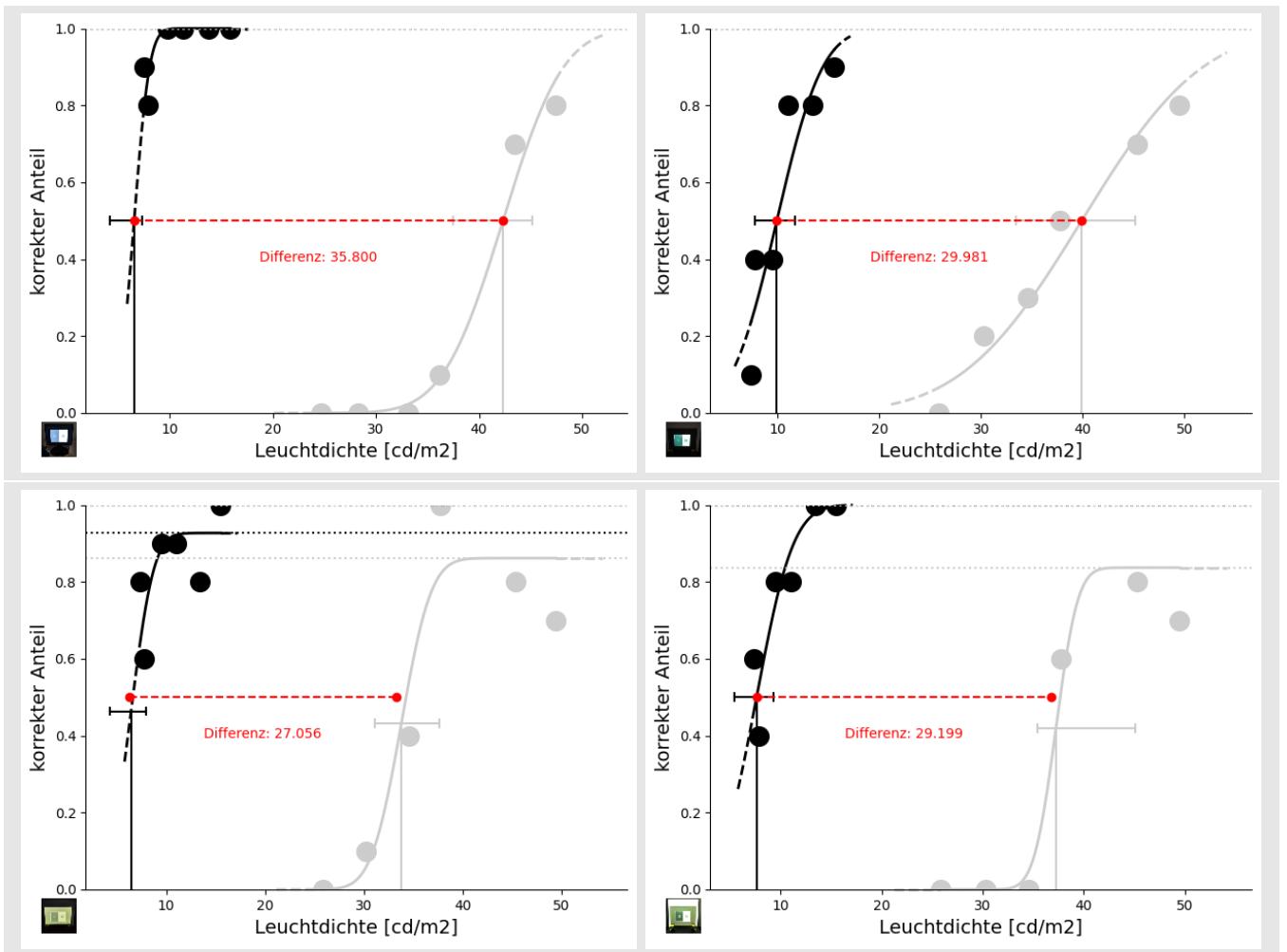
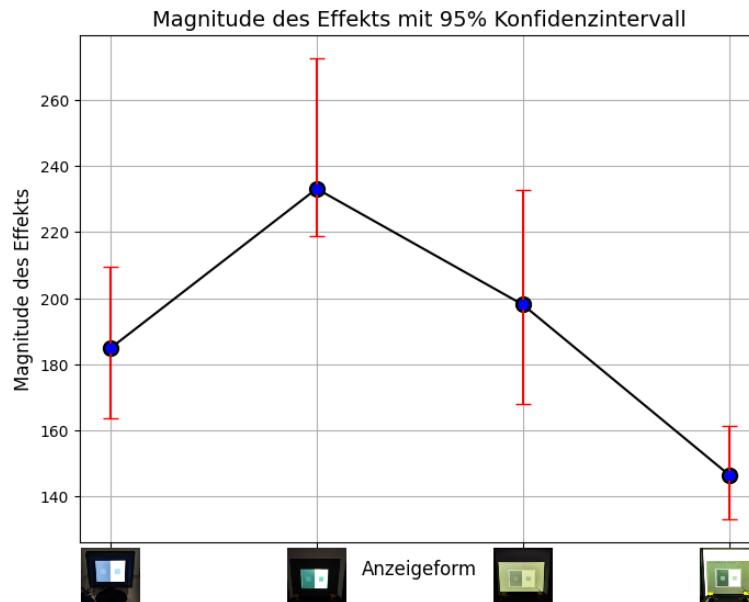
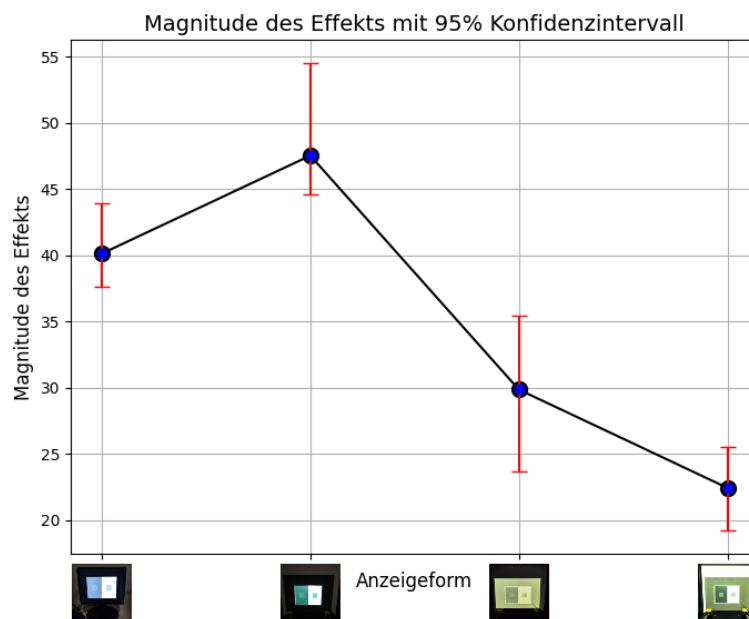


Abbildung 42: Proband: YC

8.2 Grafiken zur Zusammenfassung der Ergebnisse

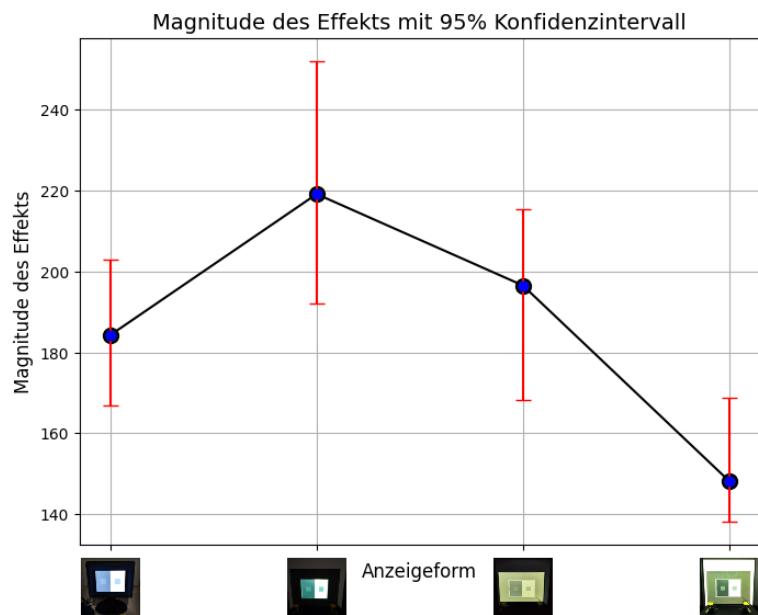


(a) Proband: CP

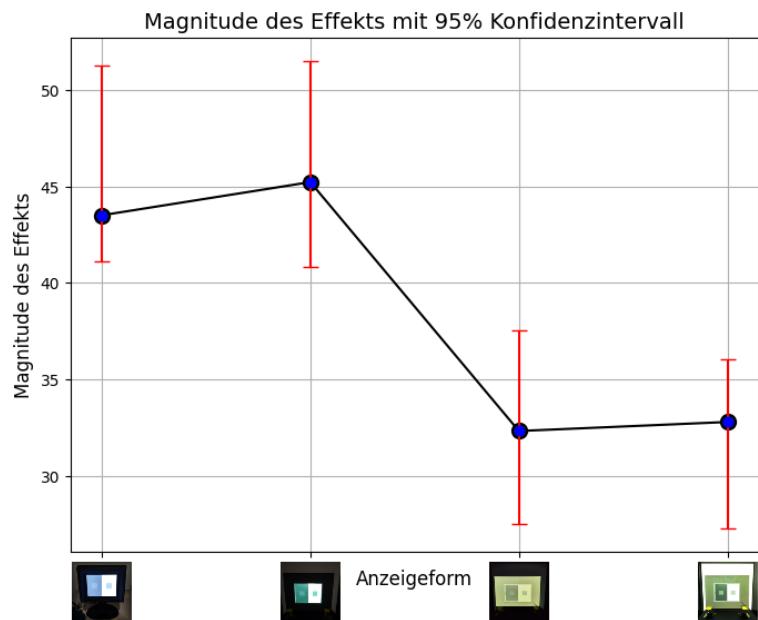


(b) Proband: CP

Abbildung 43: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

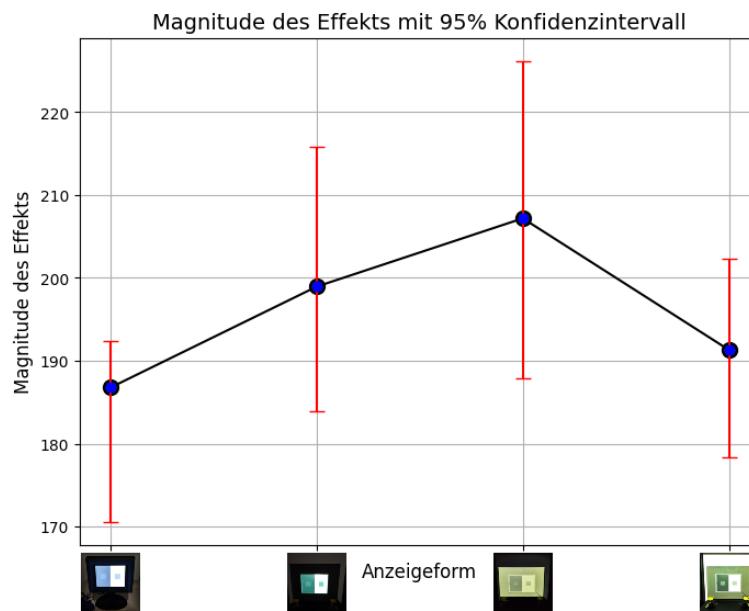


(a) Proband: KB

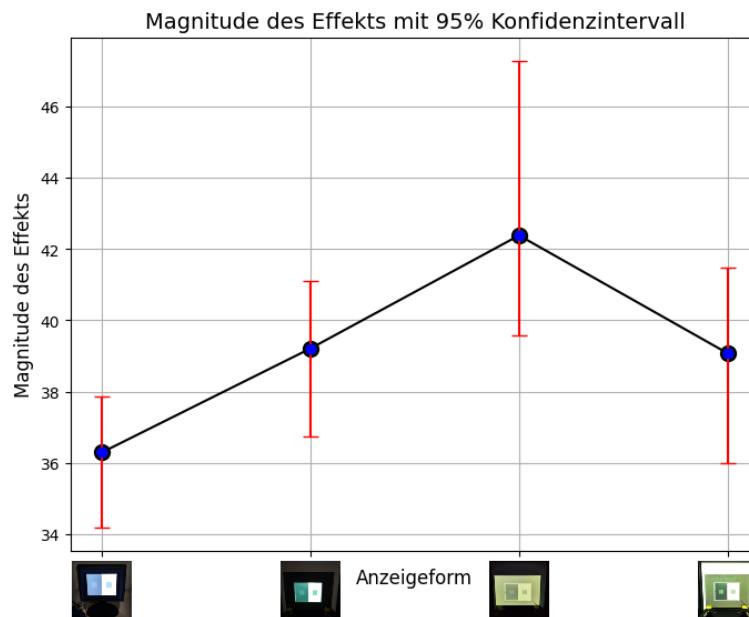


(b) Proband: KB

Abbildung 44: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

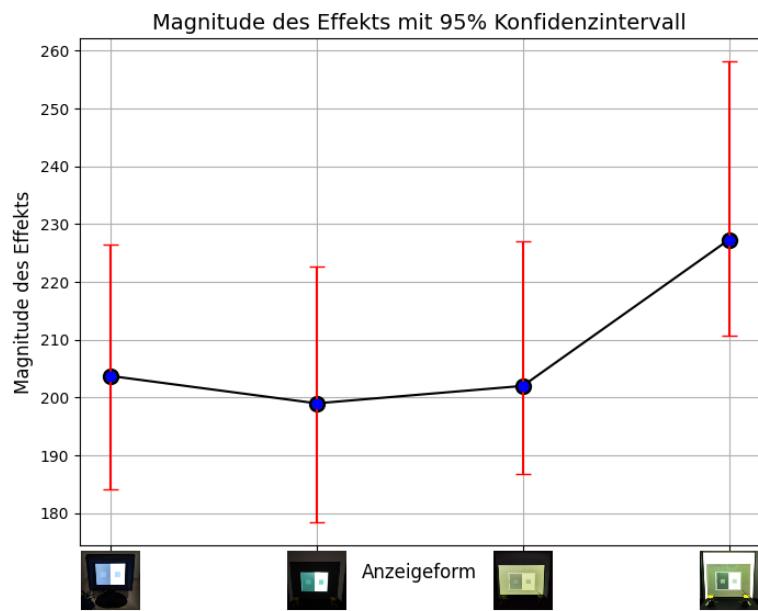


(a) Proband: DC

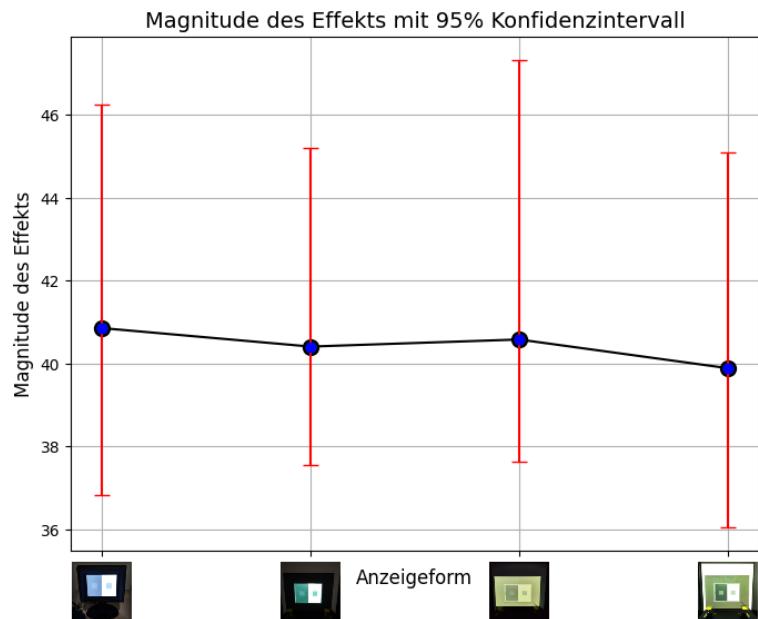


(b) Proband: DC

Abbildung 45: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

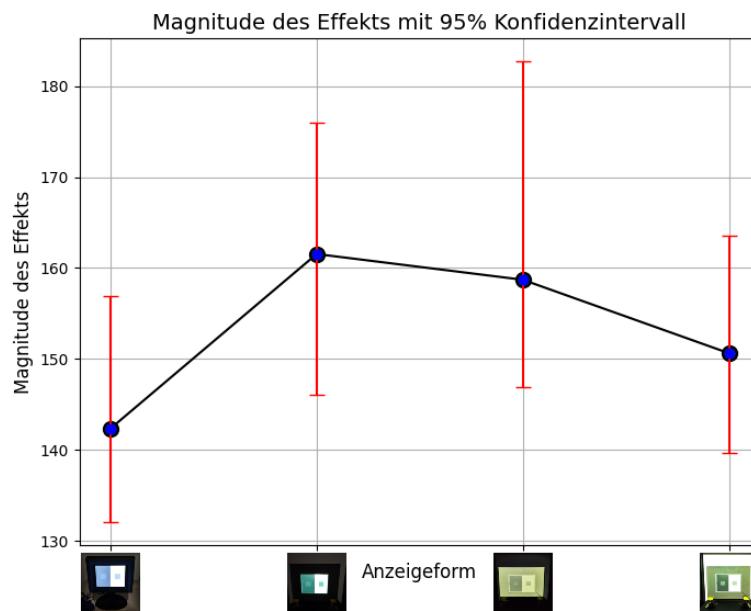


(a) Proband: GA

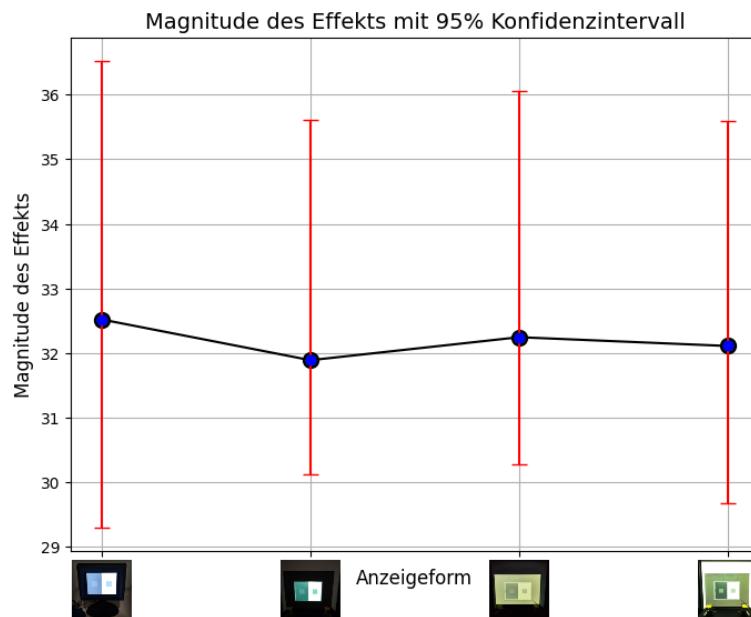


(b) Proband: GA

Abbildung 46: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

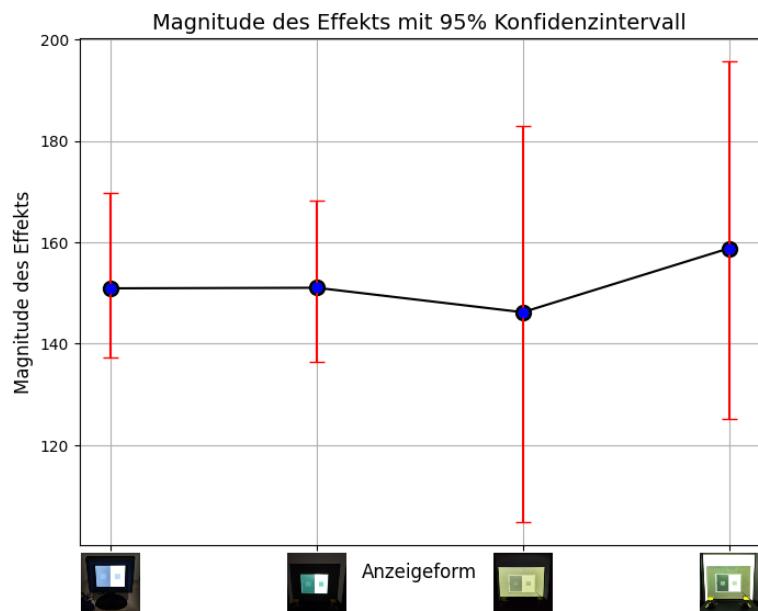


(a) Proband: MI

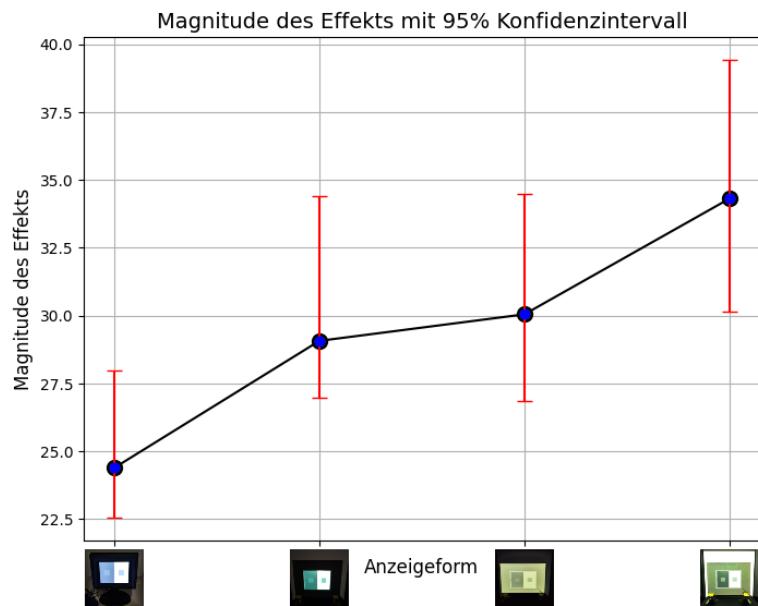


(b) Proband: MI

Abbildung 47: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

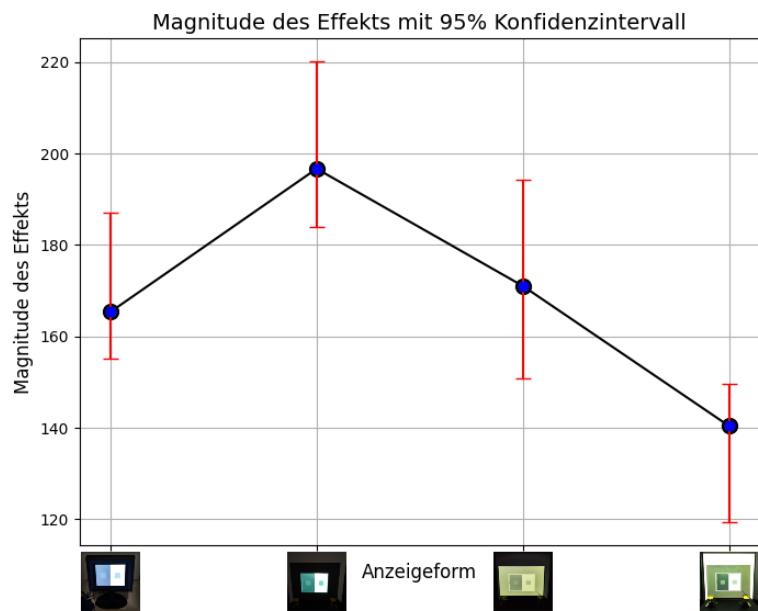


(a) Proband: OO

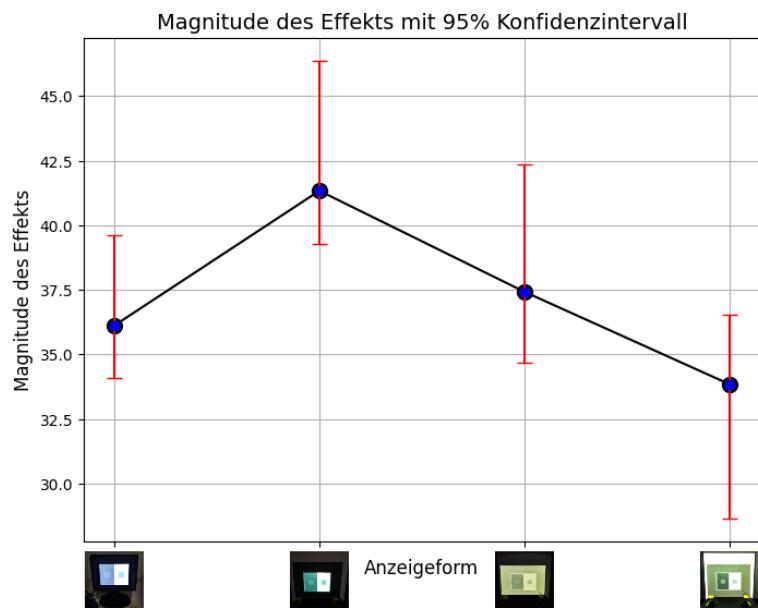


(b) Proband: OO

Abbildung 48: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall

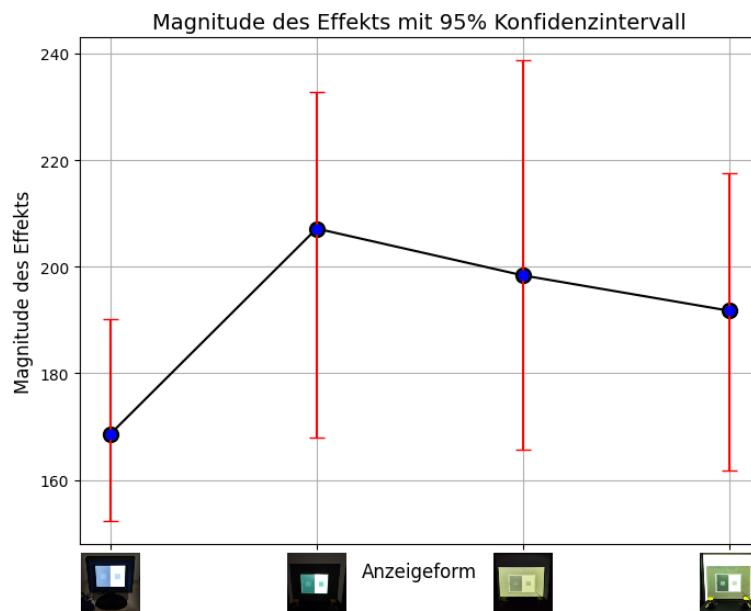


(a) Proband: SH

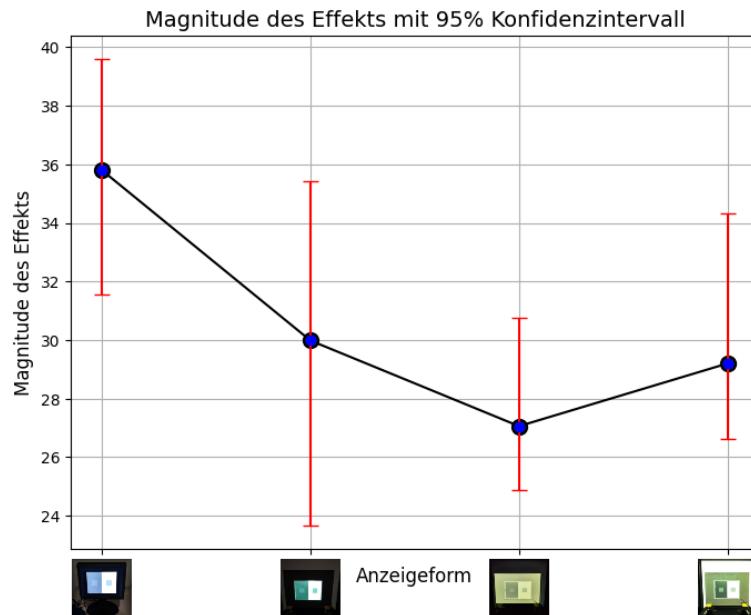


(b) Proband: SH

Abbildung 49: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall



(a) Proband: YC



(b) Proband: YC

Abbildung 50: Magnitude des Effekts mit 95% Konfidenzintervall