

Aus der Klinik und Poliklinik für Augenheilkunde
der Universität Würzburg
Direktor: Professor Dr.med. Dr.h.c. F. Grehn

Summation unterschwelliger Kontrastsignale entlang
Scheinkonturen der Ehrensteintäuschung

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg

vorgelegt von
Guido Brosinger
aus Ingolstadt

Würzburg, Dezember 2006

Referent: Priv.-Doz. Dr. T. Meigen

Koreferent: Prof. Dr. G. Geerling

Dekan: Prof. Dr. M. Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 29.06.2007

Der Promovend ist Arzt.

Summation unterschwelliger Kontrastsignale entlang Scheinkonturen der Ehrensteintäuschung

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	4
2.1. Wahrnehmung von Scheinkonturen und Scheinoberflächen.....	4
2.2. Die Ehrensteintäuschung	9
2.3. Unterschwellensummation entlang Scheinkonturen	10
2.4. Psychophysische Untersuchungsmethoden	13
3. Methodik.....	15
3.1. Aufgabenstellung.....	15
3.2. Allgemeiner Versuchsaufbau	15
3.2.1. Eichung des Monitors und Definition der Leuchtdichte	16
3.3. Elemente der Bildschirmpräsentation.....	17
3.3.1. Hintergrund.....	17
3.3.2. Reizmuster	17
3.3.2.1 Testfigur	17
3.3.2.2. Testlinie	19
3.3.3. Fixationsmarke	21
3.3.4. Ton.....	22
3.3.5. Zyklus	22
3.4. Parameter der Präsentationssoftware.....	22
3.5. Zeitlicher Ablauf der Präsentation.....	24
3.6. Forced-Choice-Prozedur.....	26
3.7. Anpassung der Testlinienleuchtdichte durch Best-Pest-Prozedur.....	28
3.8. Kurvenanpassung und Ermitteln der Leuchtdichtenschwelle	29
4. Vorversuche.....	32
4.1. Experiment 1: Ermittlung der Scheinkontur.....	32

4.1.1. Fragestellung	32
4.1.2. Methodik.....	32
4.1.3. Ergebnis	35
4.1.4 Diskussion	39
4.2. Experiment 2: Schwellenanpassung	41
4.2.1. Fragestellung	41
4.2.2. Methodik.....	41
4.2.3. Ergebnis	43
4.2.4. Diskussion	44
4.3. Experiment 3: Bestimmung der Kontrastschwelle einer Testlinie entlang der Rautenkontur der Ehrensteintäuschung	45
4.3.1. Fragestellung	45
4.3.2. Methodik.....	45
4.3.3. Ergebnis	48
4.3.4. Diskussion	50
5. Hauptversuch:	53
Experiment 4: Bestimmung der Kontrastschwelle einer Testlinie entlang der Rauten- und Kreiskontur der Ehrensteintäuschung.....	53
5.1. Fragestellung	53
5.2. Methodik.....	53
5.3. Ergebnis	56
5.3.1 Ergebnis allgemein	62
5.3.2 Ergebnis Vergleich Kreis und Raute	65
6. Allgemeine Diskussion.....	68
7. Zusammenfassung	73
8. Literaturverzeichnis	74

1. Einleitung

Das Sehen wird von sehr vielen Menschen als unser wichtigster Sinn bewertet. Tatsächlich leistet unser Sehsystem Außergewöhnliches. Es bildet unsere Umwelt in einer Weise ab, die uns ermöglicht, Form, Farbe, Räumlichkeit, Bewegung, Entfernung, Oberfläche, Geschwindigkeit und vieles mehr zu erkennen und zu bewerten. Dadurch besteht die Möglichkeit, adäquat auf die Umwelt zu reagieren und uns in dieser zu bewegen und zu handeln. Dabei sind ständig Mechanismen des Sehsystems im Gange, die erst in den letzten Jahren und Jahrzehnten in ihren Ansätzen verstanden werden konnten. Immer mehr zeigt sich dabei eine komplexe Vielfalt mit verschiedensten Interaktionen innerhalb der Wahrnehmungsstufen. Im Alltag ist uns natürlich in keiner Weise bewusst, welchen Aufwand unser Gehirn betreiben muss, um uns ein Bild der Umwelt zu präsentieren. Einen kleinen Einblick für jeden Laien in den aktiven Sehprozess zeigen die sogenannten optischen Täuschungen. Diese faszinierenden Bilder täuschen unser Sehsystem oft auf amüsante Weise und bescheren uns eine unerwartete Illusion. Hinter dem Vergnügen der Illusion zeigen sie aber auf indirektem Wege einen kleinen Teil unseres Sehprozesses, eben jenen Anteil, der durch die Täuschungsfigur eine widersprüchliche Information erhält und durch einen Mechanismus uns letztendlich eine Illusion bereitet. Mit anderen Worten und aus wissenschaftlicher Sicht gesprochen, bietet eine Täuschungsfigur einen isoliert zu betrachtenden Anteil des Sehprozesses zur genaueren Untersuchung an. Dieser isolierte Anteil des Sehprozesses ist natürlich ständig aktiv, er muss unter anderen Bedingungen wohl ein bewährtes und sinnvolles Ergebnis liefern. Er „versagt“ durch die besonderen Bedingungen einer Reizsituation, die durch eine Täuschungsfigur generiert wird. Es gibt eine Vielzahl an Täuschungsfiguren, angefangen von einfachen Kontrasttäuschungen über Farbtäuschungen, Größentäuschungen und Mustertäuschungen bis hin zu räumlichen Täuschungen. Beispielsweise kann durch eine Täuschungsfigur eine Scheinkontur erzeugt werden. Eine Scheinkontur stellt eine deutliche Wahrnehmung dar, z.B. eine Linie oder eine Form, obwohl eine entsprechende physikalische Linie oder Form nicht existiert. Die Beschaffenheit der Scheinkontur oder Scheinoberfläche wird durch die Täuschungsfigur bestimmt. Durch entsprechende Experimente können diese

Eigenschaften untersucht werden und dieser isolierte Anteil des Sehprozesses bewertet werden.

Dabei stellt sich die Frage, wie die Qualität einer Scheinkontur in einem Experiment untersucht werden kann. Die Basis für die Entwicklung der Methodik, die in dieser Arbeit Verwendung findet, stellt die These dar, dass aus Sicht der visuellen Wahrnehmung und neuronalen Informationsverarbeitung eine Scheinkontur in gleicher Weise bewertet und verarbeitet wird, wie dies bei einer realen Linie oder Kontur der Fall ist. Aufgrund dieser These werden in vielen Experimenten „Testlinien“ verwendet. Diese Linien eröffnen als Überlagerung mit einer Scheinkontur die Möglichkeit, Experimente an Scheinkonturen durchzuführen und abschließend deren Qualität sowie Einfluss- und Störgrößen zu beschreiben.

Durch die Gestaltwahrnehmung, die Texturwahrnehmung und durch die räumliche Wahrnehmung wird die Umwelt in unserem Sehsystem abgebildet. Diese Informationen ermöglichen das Erkennen von Flächen, Linien, Formen, Entfernungen, Größen, Geschwindigkeiten und vieles mehr. Diese Bewertung der visuellen Informationen und anschließende Gestaltwahrnehmung funktioniert sogar mit zum Teil verdeckten Formen, also bei einem „optischen Lückentext“. So wird z.B. eine Linie auch dann als solche erkannt, wenn im Vordergrund andere Figuren die Linie teilweise verdecken. Dies verdeutlicht eine große Leistung des visuellen Systems und die damit verbundene Auswertung der Informationen. Es ist also zur Gestalterkennung unter Umständen nur ein minimaler Anteil der Information einer Gestalt notwendig, die fehlenden oder verdeckten Anteile werden „ergänzt“ (modale Vervollständigung). Im Falle einer Scheinkontur existieren aber diese „verdeckten“ Anteile nicht, es entsteht eine Scheinkontur oder Scheinoberfläche ohne tatsächlich vorhandenes Gegenstück.

Eine sehr bekannte Täuschungsfigur ist die Ehrensteintäuschung. Sie erzeugt sowohl eine Scheinkontur als auch eine Scheinoberfläche. Diese einfache geometrische Figur besteht aus vier Linien, die auf ein gemeinsames Zentrum weisen.

Durch Versuche mit Täuschungsfiguren erhofft man sich einen Einblick in die Mechanismen zur Entstehung von Scheinkonturen und Scheinoberflächen. Sehr interessant sind dabei Experimente mit Testlinien entlang dieser Scheinkonturen. In dieser Arbeit werden speziell Versuche anhand der Ehrensteintäuschung gezeigt. Die Ehrensteintäuschung erzeugt eine Scheinkontur meist in der Form des Kreises, der

Raute oder des Quadrats. Die zentrale Frage dieser Arbeit ist, in welcher Weise sich die Wahrnehmung einer Testlinie verändert, wenn diese Testlinie entlang einer Scheinkontur der Ehrensteintäuschung präsentiert wird. In einer Publikation¹ anhand des Kanisza-Quadrats (einer weiteren verwandten Täuschungsfigur) gab es Hinweise, dass die Wahrnehmung einer Testlinie erleichtert wird, wenn diese entlang einer Scheinkontur des Kanisza-Quadrats präsentiert wird. Die Testlinie erreichte dann eine signifikant niedrigere Kontrastschwelle. Die Autoren Dresch und Bonnet stellten die These auf, dass sich die Reduktion der Kontrastschwelle durch Unterschwellensummutation (*subthreshold summation*) erklären lässt: Die Kontrastsignale der Scheinkontur und das Kontrastsignal der überlagerten Testlinie ergeben zusammen einen überschwelligen Reiz. Damit kann die Kontrastschwelle der Testlinie reduziert werden im Vergleich zur Kontrollfigur ohne Scheinkontur.

In dieser Arbeit soll die Unterschwellensummutation für die Ehrensteintäuschung untersucht werden. Der Schwerpunkt besteht dabei in der Frage, ob diese Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie ausschließlich durch die Scheinkontur zu erklären ist, oder ob entsprechende Kontrollfiguren ohne Scheinkontur ebenfalls eine Reduktion der Kontrastschwelle erzeugen können. Somit wäre das von Dresch und Bonnet beobachtete Phänomen unabhängig von den visuellen Informationen der Scheinkontur zu erklären. Zunächst werden in dieser Arbeit neben Grundlagen und Methodik zwei Vorversuche gezeigt. Das Kernstück dieser Arbeit stellt dann der Hauptversuch (Experiment 4) zur Bestimmung der Kontrastschwelle einer Testlinie entlang der Rauten- und Kreiskontur der Ehrensteintäuschung dar.

¹ Dresch B, Bonnet C. Subthreshold summation with illusory contours. *Vision Res* 1995; 35(8):1071-1078.

2. Grundlagen

2.1. Wahrnehmung von Scheinkonturen und Scheinoberflächen

Scheinkonturen und Scheinoberflächen werden als deutliche visuelle Konturen bzw. Flächen wahrgenommen, obwohl sie kein physikalisches Korrelat besitzen. Dies bedeutet, dass Scheinkonturen zum einen eine Sinnestäuschung darstellen, zum anderen aber einen Hinweis auf die grundsätzliche Gestalt- und Konturwahrnehmung und deren neuronalen Informationsverarbeitung geben, insbesondere unter der Berücksichtigung, dass die Mechanismen, die zur Wahrnehmung einer Scheinkontur führen, ständig aktiv sind und permanent in den Sehprozess eingreifen. Beim Betrachten einer Täuschungsfigur liefert also ein ansonsten korrekt arbeitender Teil des Sehprozesses ein irrtümliches Ergebnis – eine Scheinkontur. Untersuchungen an der Wahrnehmung einer Scheinkontur greifen also einen isoliert betrachtbaren Mechanismus aus dem gesamten Sehprozess heraus.

Zur Wahrnehmung einer Scheinkontur ist eine Täuschungsfigur notwendig. Diese Figur besitzt sogenannte induzierende Elemente oder *Inducer*, also bestimmte geeignete visuelle Informationen, die eine Scheinkontur auslösen können. Die folgenden Abbildungen repräsentieren typische Beispiele: die Ehrensteintäuschung, das Kanisza-Dreieck und phasenverschobene Gitterlinien (Abbildung 1 und Abbildung 2). Bei der Ehrensteintäuschung und dem Kanisza-Dreieck werden sowohl eine Scheinkontur als auch eine Scheinoberflächen erzeugt, bei den phasenverschobenen Gitterlinien wird nur eine Scheinkontur erzeugt.

Die Wahrnehmung von Scheinkonturen ist keinesfalls nur am Menschen zu beobachten. So konnte die Wahrnehmung von Scheinkonturen bei Säugetieren (Affe, Katze), bei Vögeln (Eule)^I und bei Insekten (Biene)^{II} nachgewiesen werden. Besonders die Wahrnehmung bei Katzen wurde intensiv untersucht. So zeigte sich, dass Katzen

^I Nieder A, Wagner H. Perception and neural coding of subjective contours in the owl. *Nature Neuroscience* 1999; 2:660-663.

^{II} van Hateren JH, Srinivasan MV, Wait PB. Pattern recognition in bees orientation discrimination. *J Comp Physiol A* 1990; 167:649-654.

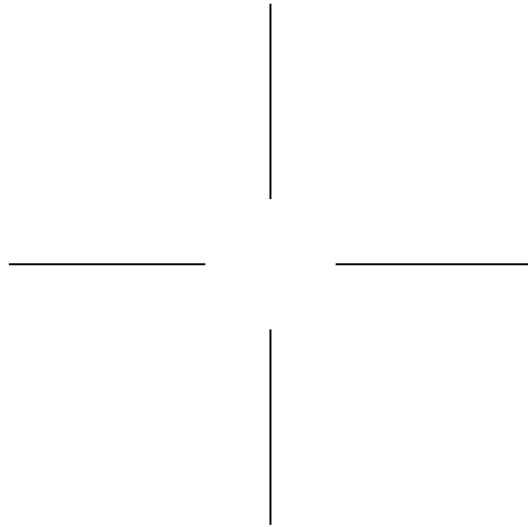


Abbildung 1:

Die Ehrensteintäuschung als Beispiel einer Täuschungsfigur, die sowohl eine Scheinkontur als auch eine Scheinoberfläche erzeugt.

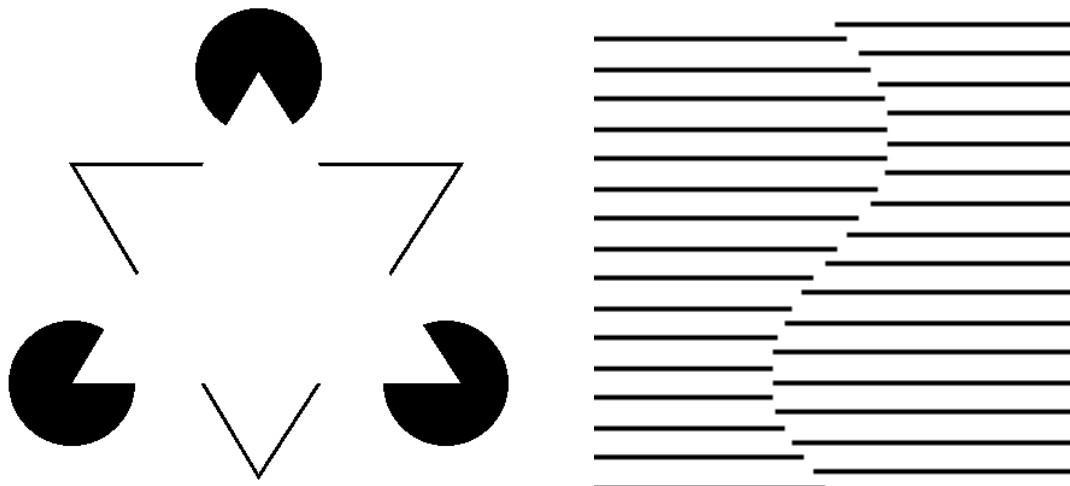


Abbildung 2:

Das Kanisza-Dreieck erzeugt wie die Ehrensteintäuschung sowohl eine Scheinkontur als auch eine Scheinoberfläche. Die phasenverschobenen Gitterlinien erzeugen lediglich eine Scheinkontur.

Kanisza-Quadrate (entsprechend dem Kanisza-Dreieck) wahrnehmen können.^I Von der Heydt, Peterhans und Baumgartner gelang sogar die neurophysiologische Ableitung von Neuronen der visuellen Großhirnrinde des Affen, die eine positive Reaktion sowohl auf Kontrastreize als auch auf Scheinkonturen zeigten.^{II} Dieser umfassende Nachweis der Wahrnehmung von Scheinkonturen im Tierreich und insbesondere in phylogenetisch zum Menschen nicht verwandten Tieren unterstützt die These, dass es sich bei der Wahrnehmung von Scheinkonturen um einen fundamentalen Anteil des Sehprozesses handelt. Darüber hinaus muss sich dieser Sehprozess in der Evolution sehr bewährt haben, nur dadurch ist eine so weitgehende Verbreitung in der heutigen Tierwelt erklärbar.

Über die neurophysiologische Entstehung von Scheinkonturen bestehen mehrere Erklärungsmodelle. Einen ursprünglichen Erklärungsansatz stellen die kognitiven Wahrnehmungstheorien dar. In diesen Modellen geht man davon aus, dass das visuelle System versucht, die wahrscheinlichste Lösung für ein Wahrnehmungsproblem zu finden. Es erfolgt eine Vervollständigung der induzierenden Elemente einer visuellen Szene durch die Kreation einer Scheinkontur.^{III} Das System findet in Form der Scheinkontur eine wahrscheinliche Form als Antwort auf den mehrdeutigen Reiz. In diesem Zusammenhang wurde der Begriff *modale Vervollständigung* geprägt.^{IV} Nach Erkennen auf kognitiver Ebene und der Figur-Hintergrund-Trennung beruht die Wahrnehmung der Scheinkontur entscheidend auf gespeicherten Figurenmustern, die durch Erfahrung und Lernen angeeignet wurden. Diese Information wird in die visuelle Szene eingebettet. Damit besteht folglich ein Informationsfluss von höheren kognitiven Stufen des visuellen Systems auf niedrigere sensorische Stufen (top-down).^V

Dem ursprünglichen Erklärungsansatz stehen einige Ergebnisse aus neueren Untersuchungen gegenüber. So ergab sich in psychophysischen und auch in

^I Bravo M, Blake R, Morrison S. Cats see subjective contours. *Vision Res* 1988; 28:861-865.

^{II} von der Heydt R, Peterhans E, Baumgartner G. Illusory contours and cortical neuron responses. *Science* 1984; 224(4654):1260-1262.

^{III} Rock I, Anson R. Illusory contours as the solution to a problem. *Perception* 1979; 8:665-681.

^{IV} Michotte A, Thines G, Crabbe G. Les compléments amodaux de structures perceptives. *Studia Psychologica Publications Universitaires de Louvain* 1964.

^V Gove A, Grossberg S, Mingolla E. Brightness perception, illusory contours, and corticogeniculate feedback. *Vis Neurosci* 1995; 12(6):1027-1052.

neurophysiologischen Experimenten ein Hinweis auf eine Beteiligung einer frühen Verarbeitungsstufe des visuellen Systems im Zusammenhang mit der Wahrnehmung von Scheinkonturen. Dabei konnte eine ähnliche Bewertung des Sehsystems von realen Konturen und Scheinkonturen auf frühen Verarbeitungsstufen in psychophysischen Experimenten nachgewiesen werden. In diesem Zusammenhang steht ein Experiment zur Untersuchung des Neigungsnacheffekts (tilt-after-effect). Dabei werden zunächst Linien betrachtet, die im Vergleich zur Vertikalen verdreht sind. Anschließend werden exakt vertikale Linien betrachtet. Diese erscheinen nun im Gegensinn verdreht. Dieser Effekt ist sowohl mit realen Linien als auch mit Scheinkonturen auslösbar, wobei jedoch die Scheinkontur einen geringeren Neigungsnacheffekt auslöst.^I Dieses Experiment legt also nahe, dass eine ähnliche Bewertung von realer Kontur und Scheinkontur im Sehsystem erfolgt, jedoch kann in diesem Rahmen nicht zwangsweise auf die Beteiligung gleicher Neurone und Verarbeitungsprozesse geschlossen werden. In elektrophysiologischen Experimenten am Affen konnten wie oben bereits erwähnt Neurone abgeleitet werden, die auf Scheinkonturen reagieren. Bemerkenswert dabei ist, dass dies bereits auf früher Ebene der Wahrnehmung in den Arealen V1 und V2 möglich ist.^{II, III} Dadurch wurde eine durch Scheinkonturen erzeugte neuronale Aktivität wenige Synapsen postretinal nachgewiesen. Dies lässt einen sensorischen Mechanismus vermuten und steht dem kognitiven Erklärungsmodell mit einem Top-Down-Mechanismus gegenüber. Zugleich wird durch diese Aussage eine ähnliche Bewertung von Kontur und Scheinkontur durch das Sehsystem bekräftigt.

Einen weit komplexeren Erklärungsansatz postulieren die Experimente von Lee und Nguyen.^{IV} Sie konnten ebenfalls die Reaktion auf eine Scheinkontur in V1 und V2 ableiten. Das Experiment wurde am Affen unter Verwendung von Kanisza-Quadraten durchgeführt. Interessanterweise reagierten die Neurone in V2 früher auf die

^I Smith A, Over R. Tilt aftereffects with subjective contours. *Nature* 1975; 257:581-582.

^{II} von der Heydt R, Peterhans E, Baumgartner G. Illusory contours and cortical neuron responses. *Science* 1984; 224(4654):1260-1262.

^{III} Peterhans E, Heitger F. Simulation of neuronal responses defining depth order and contrast polarity at illusory contours in monkey area V2. *J Comput Neurosci* 2001; 10(2):195-211.

^{IV} Lee TS, Nguyen M. Dynamics of subjective contour formation in the early visual cortex. *Proc Natl Acad Sci* 2001; 98:1907-1911.

Scheinkontur als die Neurone in V1. Dies legt die Vermutung nahe, dass ein Informationsfluss entgegen dem klassischen Weg von V1 nach V2 im Sinne einer Rückprojektion von V2 auf V1 erfolgt. Über den Sinn und die Funktion einer möglichen Rückprojektion von einem übergeordneten Areal V2 auf V1 kann derzeit nur spekuliert werden.

2.2. Die Ehrensteintäuschung

Die Ehrensteintäuschung wurde 1954 von Walter Ehrenstein beschrieben.¹ Die Grundform der Ehrensteintäuschung (Abbildung 1) besteht aus vier Linien (induzierende Elemente, Inducer), die jeweils zueinander senkrecht stehen und auf einen gemeinsamen zentralen Punkt weisen. Im scheinbaren Schnittpunkt der Linien befindet sich eine zentrale Lücke. Die vier Linien erzeugen im Bereich der zentralen Lücke eine Scheinkontur und eine Scheinoberfläche.

Die Form der Scheinkontur bei der Grundform erscheint als Kreis, Raute oder Quadrat (siehe Experiment 1). Durch weitere induzierende Linien kann die Grundform entsprechend erweitert werden und damit kann die Form der Scheinkontur eindeutig definiert und z.B. als Kreis gesehen werden.

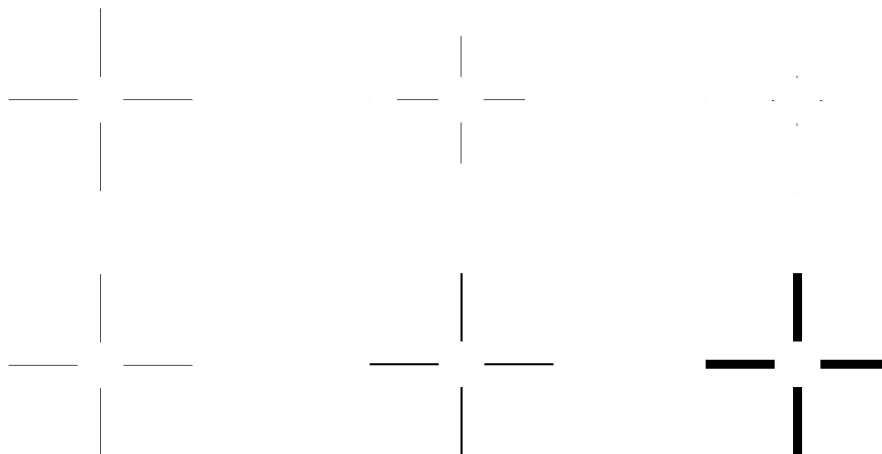


Abbildung 3:

Die Qualität der Scheinkontur und der Scheinoberfläche der Ehrensteintäuschung steht in enger Beziehung zur Beschaffenheit (Längen und Stärken) der induzierenden Linien.

¹ Ehrenstein W. Über die Abwandlung der L. Hermannschen Helligkeitserscheinung. Zeitschrift für Psychologie 150:83-91.

Die Scheinoberfläche erscheint heller als die Umgebung.^I Dies gilt für beide Kontrastpolaritäten der induzierenden Linien.^{II}

Die Qualität der Scheinkontur und der Scheinoberfläche steht in enger Beziehung zur Beschaffenheit der induzierenden Linien (Abbildung 3). Erst ab einer bestimmten Größe und Stärke der induzierenden Linien bezogen auf die Größe der zentralen Lücke werden eine Scheinkontur und eine Scheinoberfläche erkennbar. Die Qualität der Scheinkontur und der Scheinoberfläche nimmt jedoch ab einer gewissen Länge der induzierenden Linien nicht weiter zu.^{III}

Bei farbigen induzierenden Linien auf weißem Grund kann sogar eine farbige Scheinoberfläche (neon colour effect)^{IV} erzeugt werden.

2.3. Unterschwellensummutation entlang Scheinkonturen

Der ursprüngliche Ansatz der Summation unterschwelliger Kontrastsignale (subthreshold summation) stammt von Kulikowski und King-Smith.^V In einem Experiment präsentierten sie Linien, die isoliert betrachtet als Reiz nicht erkennbar waren, also unter der Wahrnehmungsschwelle lagen. Dieses unterschwellige Kontrastsignal überlagerten sie mit einem ebenfalls unterschwelligen Signal aus einem periodischen Sinusgitter. Erreichte das Sinusgitter seinen maximalen Kontrast, wobei dieses Signal trotzdem unterhalb der Wahrnehmungsschwelle lag, entstand zusammen mit der überlagerten, unterschwelligen Linie ein wahrnehmbarer Reiz. Es wurden also zwei unterschwellige Signale „summiert“ und erreichten damit zusammen einen Kontrast oberhalb der Wahrnehmungsschwelle (Abbildung 4). Der Reiz wird

^I Spillmann L, Fuld K, Gerrits HJ. Brightness contrast in the Ehrenstein illusion. *Vision Res* 1976; 16(7):713-719.

^{II} Hamada J. Overall brightness decrease observed in the Ehrenstein illusion induced for both contrast polarities. *Percept Psychophys* 1987; 41(1):67-72.

^{III} Salvano-Pardieu V. Spatial factors of brightness illusion in the Ehrenstein figure. *Perception* 2000; 29(6):709-720.

^{IV} Redies C, Spillman L. The neon color effect in the Ehrenstein illusion. *Perception* 1982; 10(6):667-681.

^V Kulikowski JJ, King-Smith PE. Spatial arrangement of line, edge and grating detectors revealed by subthreshold summation. *Vision Res* 1973; 13(8):1455-1478.

wahrnehmbar. Man kann daher von einem Senken der Kontrastschwelle für die Testlinie sprechen.

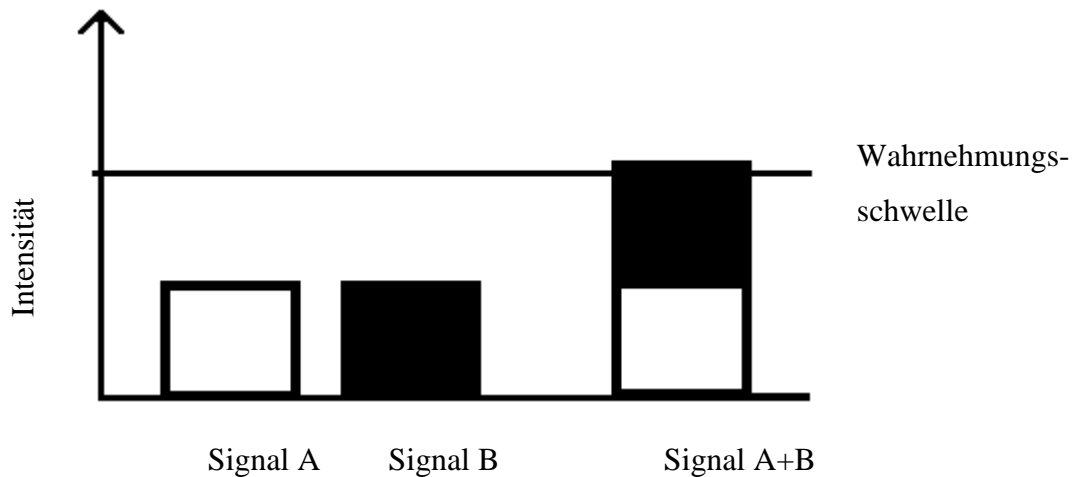


Abbildung 4:

Verdeutlichung der „Summation“ unterschwelliger Kontrastsignale (subthreshold summation); ein Reiz alleine kann nicht wahrgenommen werden, erst die Überlagerung der beiden Kontrastreize überschreitet die Wahrnehmungsschwelle.

Basierend auf der These, dass die Wahrnehmung einer Scheinkontur im frühen Sehprozess mit der Wahrnehmung eines realen Reizes gleichzusetzen ist (siehe Kapitel 2.1. *Wahrnehmung von Scheinkonturen und Scheinoberflächen*), untersuchten Dresch und Bonnet in einem Experiment Testlinien, die entlang Scheinkonturen des Kanisza-Quadrats präsentiert wurden.¹ Dieses psychophysische Experiment wurde mit einer Forced-Choice-Prozedur durchgeführt. Die Versuchsperson sollte entscheiden, auf welcher der beiden Seiten des Kanisza-Quadrats die Testlinie erscheint. Die Testlinie verband dabei zwei induzierende Elemente des Kanisza-Quadrats. Eine Kontrollfigur wurde zum Vergleich getestet. Sie bestand aus zwei Markierungen, die keine Scheinkontur produzierten, jedoch einen räumlichen Anhaltspunkt zum Auffinden der Testlinie gaben. Dabei zeigte sich, dass die Kontrastschwelle der Testlinie, die entlang der Scheinkontur des Kanisza-Quadrats präsentiert wurde, signifikant unter der

¹ Dresch B, Bonnet C. Subthreshold summation with illusory contours. *Vision Res* 1995; 35(8):1071-1078.

Kontrastschwelle der Testlinie der Kontrollfigur lag. Dies konnte für beide Kontrastpolaritäten nachgewiesen werden. Dresch und Bonnet folgerten daraus, dass sich die Reduktion der Kontrastschwelle durch Unterschwellensummation erklären lässt. Die Kontrastsignale der Scheinkontur und das Kontrastsignal der überlagerten Testlinie ergeben zusammen einen überschwelligen Reiz. Damit kann die Kontrastschwelle der Testlinie reduziert werden im Vergleich zur Kontrollfigur ohne Scheinkontur.

2.4. Psychophysische Untersuchungsmethoden

Die Psychophysik bietet die Möglichkeit der Bestimmung einer Quantität von subjektiven Wahrnehmungen und Wahrnehmungsempfindungen. Der Begriff wurde durch Fechner geprägt.¹ Ein Grundproblem in vielen Experimenten stellt die Schwierigkeit der Erfassung einer Wahrnehmung einer Versuchsperson dar. Eine direkte Messung ist meist nicht möglich. Die Lösung durch die Psychophysik besteht darin, dass ein Vergleich zwischen zwei (oder mehreren) Reizen gestellt wird. Beispielsweise kann dadurch die Ausprägung einer Scheinkontur und Scheinoberfläche einer Ehrensteintäuschung durch den Vergleich von zwei Figuren erfolgen. In diesem Zusammenhang wurde die „Schwelle“ als eben merklicher Unterschied definiert. Die Empfindlichkeit wurde als Kehrwert der Schwelle definiert. Das psychophysische Experiment soll diese Schwelle finden. Dazu sind viele Messdatenpunkte, also Aufgabenwiederholungen, notwendig. Dies bedeutet, je mehr Messdaten erhoben werden, desto exakter kann die Schwelle definiert werden. Das Ergebnis lässt dann einen Rückschluss auf die subjektive Wahrnehmung und Empfindung zu.

Neben einfachen Ja-Nein-Antwortschemata über das Vorhandensein eines Reizes werden oft Forced-Choice-Prozeduren verwendet. In diesen Experimenten erscheint immer ein Reiz, die Versuchsperson muss unter mehreren Möglichkeiten auswählen, z.B. wo dieser Reiz dargeboten wurde. Diese Methode hat den großen Vorteil, dass interne Entscheidungskriterien nicht als Störgrößen fungieren können. Bei einfachen Ja-Nein-Antwortschemata kann sich z.B. bei einer unsicheren Versuchsperson eine Antworttendenz zu „Nein“ ergeben, während bei einer ehrgeizigen Versuchsperson eine Bevorzugung einer Ja-Antwort denkbar wäre. Bei der Forced-Choice-Aufgabe muss immer eine Antwort erfolgen und jede Antwortmöglichkeit hat dabei die gleiche Trefferwahrscheinlichkeit. Diese ist mathematisch exakt durch $p=1/n$ mit $n=Anzahl\ der\ Antwortmöglichkeiten$ definiert. Die Schwelle liegt dabei zwischen $p=1$ für sicheres Lösen der Aufgabe und $p=1/n$. Diese Trefferwahrscheinlichkeit $p=1/n$ ist dem Rateniveau gleichzusetzen. Die Versuchsperson muss raten, wenn kein Reiz oder Unterschied erkennbar ist, da in jedem Fall eine Antwort erfolgen muss. Durch das

¹ Fechner GT. Elemente der Psychophysik. Breitkopf & Härtel 1860.

Erzwingen einer Antwort im Zusammenhang mit einer gleichen Trefferwahrscheinlichkeit für jede Antwort ist ein Einfluss von internen Entscheidungskriterien auszuschließen.

3. Methodik

In dieser Arbeit werden vier Experimente vorgestellt. Die Methodik des Experiments 1 unterscheidet sich grundlegend von den Experimenten 2, 3 und 4 und wird deshalb im eigenen Methodikteil des Vorversuchs beschrieben.

In diesem allgemeinen Teil sollen die gemeinsamen methodischen Grundlagen der Experimente 2, 3 und 4 erörtert werden, die spezifischen Parameter werden ebenfalls im jeweiligen Methodikteil des entsprechenden Experiments beschrieben.

3.1. Aufgabenstellung

Bei den Experimenten 2, 3 und 4 handelt es sich um psychophysische Experimente mit einer Forced-Choice-Prozedur. Dem Probanden wurden bei diesen Experimenten Reizmuster auf einem Monitor dargeboten, die Reizmuster wurden von einem Rechner generiert. Die verwendeten Reizmuster bestanden aus einer Figur und einer Testlinie. Präsentiert wurden dabei die Ehrensteintäuschung und verschiedene Kontrollfiguren jeweils zusammen mit einer Testlinie. Die Testlinien wurden entlang der Rauten- und Kreiskontur der Ehrensteintäuschung präsentiert und konnten vier mögliche Positionen einnehmen (siehe z.B. Abbildung 6). Die Aufgabe der Probanden bestand darin, durch Drücken einer entsprechenden Taste eine Antwort bezüglich der Position dieser Testlinie zu geben.

3.2. Allgemeiner Versuchsaufbau

Der Versuchsraum konnte komplett vom natürlichen Licht verdunkelt werden. Eine kleine dimmbare Lampe sorgte für eine indirekte Raumbelichtung, die zum einen photopisches Sehen ermöglichte und zum anderen einen angenehmen und blendfreien Blick auf den Monitor gewährleistete.

Es wurde ein PowerMac 7500/100 verwendet. Der verwendete Monitor hatte eine Größe von 17 Zoll (AppleVision 1705). Vor jedem Experiment wurde der Monitor geeicht und diese Einstellung während des gesamten Experiments beibehalten (siehe

Kapitel 3.2.1. *Eichung des Monitors*). Vor jeder Testung einer Versuchsperson wurde die Glasoberfläche des Monitors gereinigt.

Vor dem Versuchsbeginn wurde zunächst bei normaler Raumbelichtung der Visus des Probanden bestimmt. Anschließend wurde die Sitzposition für den Probanden eingerichtet. Dies bestand aus einem festgelegten Abstand zum Monitor und dem Einstellen einer Kinnstütze. Danach wurde dem Probanden die Aufgabe erklärt und die entsprechenden Antworttasten gezeigt.

In einem Probedurchlauf mit mehreren Zyklen konnte der Proband die Aufgabe näher kennen lernen. Dem Proband wurde zuvor mitgeteilt, dass dies eine Übung ist. In dieser Übung wurden ihm alle der später in der Messung verwendeten Figuren gezeigt. So konnte sich der Proband in die Aufgabe einarbeiten und die Bedienung der Antworttasten erlernen. Fragen zum Verständnis der Aufgabenstellung konnten anhand der Übung gut beantwortet werden.

Anschließend wurde die Messung gestartet. Die Zeiteinteilung während der Messung, also z.B. die Geschwindigkeit bis zum Drücken der Antworttaste und die Pausen zwischen den Zyklen konnte der Proband nach seinem eigenen Ermessen einteilen.

3.2.1. Eichung des Monitors und Definition der Leuchtdichte

Vor jedem Experiment wurde der Monitor mit Hilfe eines Eichprogramms und eines Photometers in Bezug auf die Helligkeit (Leuchtdichte) geeicht und diese Einstellung während des gesamten Experiments beibehalten.

Da ein Monitor (mit Bildröhre) keine exakt gleiche Helligkeit (Leuchtdichte) der gesamten Fläche produziert, sondern in der Mitte heller ist, wurden sowohl die Eichungen als auch die Messungen mit der Präsentation der Figuren in der Monitormitte vorgenommen.¹

In den folgenden Ausführungen wird zur Beschreibung der Helligkeit von Hintergrund, Testlinie, Figur usw. der physikalisch exaktere Ausdruck der Leuchtdichte verwendet. Die Leuchtdichte ist definiert als Lichtleistung pro Flächeneinheit und trägt die Einheit Candela pro Quadratmeter (cd/m^2).

¹ Bach M, Meigen T, Strasburger, H. Raster-scan cathode ray tubes for vision research -- limits of resolution in space, time and intensity, and some solutions. *Spatial Vision* 1997, 10: 403-414.

In diesen Experimenten bedeutet Leuchtdichte das Zuweisen einer bestimmten Graustufe durch den Rechner zu der ermittelten Leuchtdichte des Monitors. Die in diesen Experimenten verwendeten PowerMac-Rechner konnten 256 verschiedene Graustufen präsentieren. Dabei ist es möglich, dass bestimmte Leuchtdichtewerte nicht exakt präsentiert werden können. Die Leuchtdichte des Hintergrunds entspricht beispielsweise im Experiment 2 und 4 nicht exakt dem Zielwert von 40 cd/m^2 , da aufgrund der Eichkurve in Verbindung mit den 256 Grautönen (also Leuchtdichtestufen) die Leuchtdichte 40 cd/m^2 nicht präsentiert werden kann. Die nächst liegende Graustufe hat die Leuchtdichte $39,84 \text{ cd/m}^2$ und wurde vom Rechner für die Präsentation des Hintergrunds verwendet.

3.3. Elemente der Bildschirmpräsentation

3.3.1. Hintergrund

Der Hintergrund wurde als graue Fläche gezeigt. Die Leuchtdichte des Hintergrunds konnte durch Zuweisen einer bestimmten Graustufe verändert werden, z.B. auf eine Leuchtdichte des Hintergrunds von 40 cd/m^2 .

3.3.2. Reizmuster

Das Reizmuster besteht aus der Testfigur (Ehrensteintäuschung, Kontrollfigur 1, Kontrollfigur 2) und einer Testlinie.

3.3.2.1 Testfigur

Die Software erlaubte es, vielfältige Parameter der Testfigur zu verändern.

Zum einen konnte die klassische Ehrensteintäuschung in ihrer Größe, der Stärke und Länge der Linien, der Größe der zentralen Lücke und in der Leuchtdichte verändert werden. Leuchtdichte bedeutet wie beim Hintergrund das Zuweisen einer bestimmten Graustufe. Diese Leuchtdichte ist im Eichprogramm ebenfalls messbar. Durch die Variation der Leuchtdichte einer Ehrensteintäuschung konnte im Zusammenhang mit

der Leuchtdichte des Hintergrunds der Kontrast und auch die Kontrastpolarität verändert werden.

Der Kontrast (K) wird dabei folgendermaßen definiert:

$$K = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$

mit I_1 = Leuchtdichte des Inducers

I_2 = Leuchtdichte des Hintergrunds

Unterschiedliche Kontrastpolarität ist dadurch definiert, dass sich für $I_1 > I_2$ positive Werte für K ergeben und entsprechend für $I_1 < I_2$ negative Werte für K. Eine positive Kontrastpolarität entsteht also wenn die Figur heller als der Hintergrund präsentiert wird, eine negative bei dunkler Figur auf hellerem Hintergrund.

Zum anderen konnten die Linien der Ehrensteintäuschung auf eine Länge reduziert werden, so dass diese punktförmig wurden und somit eine Kontrollfigur bestehend aus vier Punkten entstand (*Kontrollfigur 1, 4P*). Es war sogar möglich, die Figur mit Linienlänge Null zu präsentieren (siehe Abbildung 5). Bei dieser so entstandenen Kontrollfigur sind im Experiment also nur die Testlinien, aber keine Figur sichtbar (*Kontrollfigur 2, K*).

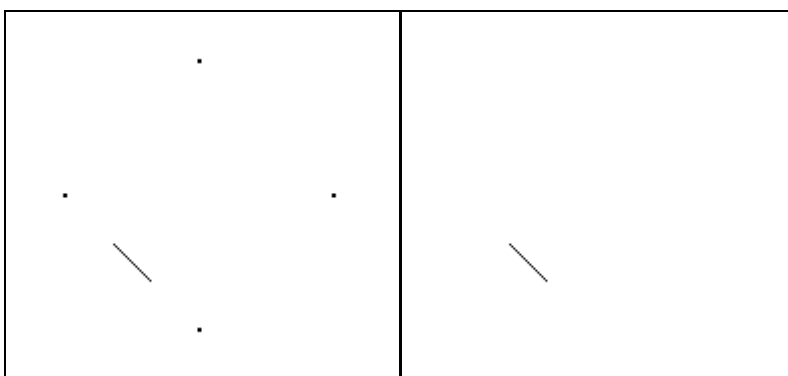


Abbildung 5:

Kontrollfigur 1(4P) und Kontrollfigur 2 (K) jeweils mit einer Testlinie links unten.

Sämtliche Kontrollfiguren konnten folglich als eine Extremform der Ehrensteintäuschung durch entsprechende Parameter eingegeben werden, ohne dass sich im Ablauf des Programms und somit im Ablauf des Experiments technische Unterschiede zwischen der Präsentation der Ehrensteintäuschung und der entsprechenden Präsentation einer Kontrollfigur ergeben. Folglich können technisch bedingte Störgrößen ausgeschlossen werden.

Die Anzahl der nacheinander gezeigten Figuren in einem Zyklus konnte vorgegeben werden. Dabei wurde in einem Zyklus nur jeweils ein Figurentyp (Ehrensteintäuschung, Kontrollfigur 1 oder Kontrollfigur 2) verwendet. Innerhalb eines Zyklus unterschieden sich deshalb die Reizmuster, also die Kombination aus Figur und Testlinie, nur durch die Position der Testlinie. Die Zeit zwischen den einzelnen Figuren variierte durch eine Zufallsautomatik, um einer Ermüdung des Probanden sowie einem mechanischen Reagieren durch einen monotonen Rhythmus vorzubeugen. Der minimale und maximale Zeitraum zwischen den Figuren konnte ebenfalls vorgegeben werden.

3.3.2.2. Testlinie

Als Testlinie wird in diesen Experimenten die Linie bezeichnet, die entlang der entsprechenden Scheinkontur der Ehrensteintäuschung gezeigt wird. Zusammen mit der Testfigur bildet sie das Reizmuster. Die Aufgabe des Probanden ist es, diese Linie wahrzunehmen und anzugeben, in welcher Position sie sich befindet. Dabei gibt es vier mögliche Positionen: rechts oben, links oben, rechts unten und links unten. Die Testlinie kann in ihrer Länge variiert werden, das heißt maximale Länge wäre dann eine rautenförmige Verbindung der zentralen Enden der induzierenden Linien, Länge Null wäre keine sichtbare Testlinie. Neben dieser Präsentation entlang der Rautenkantur kann auch eine Linie entlang der Kreiskantur gezeigt werden. Dabei gilt zu beachten, dass eine geometrisch exakte Darstellung eines Kreises auf einem Monitor aufgrund des quadratischen Pixelrasters derzeit nicht möglich ist. Die Abweichung der Pixel vom geometrischen Ideal eines Kreises wird umso größer, je kleiner der Kreis ist. Deshalb wurde folgender Kompromiss erzielt: Zum Test entlang der Kreiskantur wurde eine Linie verwendet, die wie eine Tangente der Kreiskantur angelagert wurde.

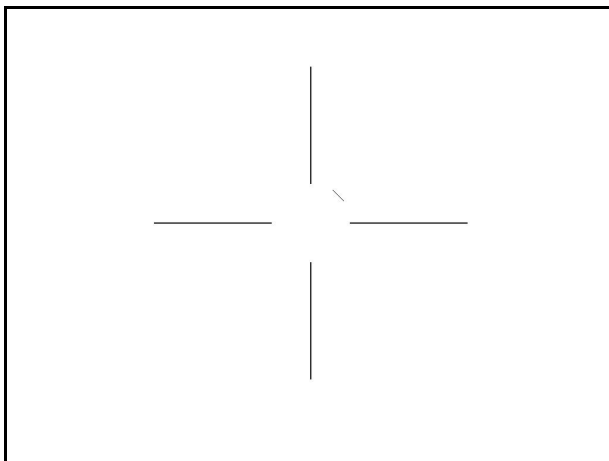


Abbildung 6:

Ehrensteintäuschung mit Testlinie (reduzierte Länge, Position rechts oben) entlang der Kreiskontur.

Wenn zudem diese Linie nicht in voller Länge, sondern nur z.B. in 1/3 der Länge präsentiert wird, das heißt also als scheinbares Kreissegment, so ist diese Abweichung von einem geometrisch exakten Kreissegment nicht zu erkennen. Durch diese Methode ist aber gewährleistet, dass in allen vier Quadranten gleiche Testlinien präsentiert werden.

Die Leuchtdichte der Testlinie wird wie bei den anderen Elementen durch Zuordnen einer bestimmten Graustufe festgelegt. Dabei wird nur die Leuchtdichte der ersten Testlinie angegeben. Diese Leuchtdichte liegt in den folgenden Experimenten über der des Hintergrunds, wobei die Software auch eine dunklere Testlinie im Vergleich zum Hintergrund präsentieren könnte, das heißt es können also verschiedene Kontrastpolaritäten erreicht werden. In den weiteren Erläuterungen wird immer von einer helleren Testlinie im Vergleich zum Hintergrund ausgegangen.

Die Leuchtdichte der Testlinien, die zusammen mit der zu testenden Ehrensteintäuschung bzw. Kontrollfigur innerhalb eines Zyklus gezeigt werden, kann teilweise fest vorgegeben werden und zum anderen vom Rechner automatisch über eine Best-Pest-Prozedur je nach richtiger oder falscher Antwort des Probanden ermittelt werden (siehe Kapitel 3.7. *Anpassung der Testlinienleuchtdichte durch Best-Pest-Prozedur*). Eine feste Vorgabe der Leuchtdichte der Testlinien ist bei Beginn des Zyklus erforderlich, zusätzlich wurden in den Experimenten 2 und 4 auch innerhalb eines

Zyklus Testlinien mit einem vorgegebenen hohen Kontrast gezeigt, um die Probanden mit einer „leichten“ Aufgabe zu motivieren.

Die Darbietungszeit der Testlinie konnte ebenfalls verändert werden. Bei unbegrenzter Darbietungszeit war die Kombination „Figur mit Testlinie“ bis zum Drücken einer Antworttaste durch den Probanden zu sehen. Bei begrenzter Darbietungszeit wurde nach einer bestimmten Zeit, z.B. 200 ms, die Testlinie maskiert. Dies bedeutet, dass die Kombination Figur und Testlinie 200 ms lang zu sehen war, danach wurden vier „Testlinien“ in den vier Quadranten in der vorgegebenen Leuchtdichte der Maskierung gezeigt. Es war also eine Kombination aus Figur und vier Maskierungslinien zu sehen, die exakt über den möglichen Positionen der Testlinien gelagert wurden. Damit stand dem Probanden nur eine begrenzte Zeit für das Erkennen der eigentlichen Testlinie zur Verfügung. Zur zeitlichen Begrenzung der Darstellung einer Testlinie wäre auch das Beenden der Präsentation der Testlinie denkbar, das heißt die Testlinie würde einfach verschwinden. Dadurch würde aber ein erneuter lokaler Kontrastreiz entstehen und die Messung verfälscht werden. Aus diesem Grund wurde zur zeitlichen Begrenzung der Präsentation der Testlinie die oben beschriebene Maskierung verwendet.

3.3.3. Fixationsmarke

Die Präsentation der Fixationsmarke erfolgte in der Mitte des Bildschirms. Die Fixationsmarke befand sich im gedachten Schnittpunkt der Linien der Ehrensteintäuschung und somit genau in der Mitte der Präsentationsfigur. Diese Fixationsmarke erschien punktförmig, war technisch bedingt quadratisch, z.B. bestehend aus vier Pixel. Die Zeitdauer der Präsentation konnte verändert werden. Sie konnte in ihrer Leuchtdichte und damit auch im Vergleich zum Hintergrund in Kontrast und Kontrastpolarität verändert werden. Die Fixationsmarke war bis zur Präsentation der Kombination Figur und Testlinie zu sehen und sollte es dem Probanden erleichtern, seine Aufmerksamkeit ins Zentrum dieser Präsentation zu richten.

3.3.4. Ton

Zusammen mit der Präsentation von Figur und Testlinie war ein kurzer Ton zu hören. Der Ton definierte den entscheidenden Zeitpunkt der Darbietung. Der Ton war unabhängig von einer korrekten oder falschen Antwort des Probanden. Der Ton sollte es der Versuchsperson erleichtern, die gesamte Aufmerksamkeit auf den sehr kurzen Zeitpunkt der Präsentation von Figur und Testlinie zu konzentrieren.

3.3.5. Zyklus

Ein Zyklus bedeutet eine Versuchseinheit. In einem Zyklus werden z.B. 30 identische Figurentypen gezeigt. Die Position der Testlinie bezüglich der Rauten- oder Kreiskontur und die Darbietungszeit des Reizmusters innerhalb eines Zyklus ist ebenfalls einheitlich. Die Reizmuster (Figur und Testlinie) unterscheiden sich nur in der Position der Testlinie (rechts oben, links oben, rechts unten und links unten). Nach Ende eines Zyklus kann der Proband selbstständig seine Pause bestimmen, der Proband startet durch Drücken einer Taste den nächsten Zyklus.

3.4. Parameter der Präsentationssoftware

Die Software wurde von Dr. Thomas Meigen programmiert und ermöglichte es, die Ehrensteintäuschung und verschiedene Kontrollfiguren zusammen mit einer Testlinie zu präsentieren, sowie die so gewonnenen Daten aufzuzeichnen und entsprechend zu analysieren. Die oben erläuterten Elemente der Bildschirmpräsentation konnten als Parameter der Präsentationssoftware verändert werden (siehe Tabelle 1).

Hintergrund:	- Leuchtdichte
Figur:	- Leuchtdichte Im Zusammenhang mit der Leuchtdichte des Hintergrunds kann somit der Kontrast variiert werden - Größe und Stärke der Linien - Größe der zentralen Lücke - Anzahl der nacheinander präsentierten Figuren (Zyklus) - Zeit zwischen den einzelnen Figuren
Testlinie:	- Leuchtdichte der ersten Testlinien - Leuchtdichte der Testlinie zur Motivation - Stärke und Länge - Position (entlang der Rauten- bzw. Kreiskontur) - Darbietungszeit (unbegrenzt oder maskiert)
Fixationsmarke:	- ja/nein - Leuchtdichte - Größe - Zeitdauer
Ton:	- ja/nein
Zyklus:	- Anzahl der Testfiguren in dieser Versuchseinheit

Tabelle 1:

Die Parameter der Präsentationssoftware.

3.5. Zeitlicher Ablauf der Präsentation

Zunächst war der graue Bildschirm entsprechend der gewählten Hintergrundsleuchtdichte zu sehen (Abbildung 7a). Es folgte die Präsentation der Fixationsmarke in der Mitte des Bildschirms entsprechend der gewählten Zeitdauer, z.B. 200 ms (Abbildung 7b). Im direkten Anschluss danach erfolgte die Präsentation der jeweiligen Figur zusammen mit einer Testlinie. Im gezeigten Beispiel der Abbildung 7c wird die Ehrensteintäuschung zusammen mit einer Testlinie präsentiert. Diese Testlinie wird in maximaler Länge entlang der Rautenkontur präsentiert, ihre Position ist hier rechts oben. Bei unbegrenzter Darbietungszeit im Experiment 3 war diese Kombination aus Figur und Testlinie bis zum Drücken einer Taste durch den Probanden zu sehen. Bei begrenzter Darbietungszeit (in den Experimenten 2, 3 und 4) wurde die Testlinie nach einer bestimmten Zeit maskiert, indem in allen vier Quadranten Maskierungslinien in einer entsprechenden Leuchtdichte überlagert wurden. Diese Maskierungslinien entsprechen vier in allen Quadranten gezeigten „Testlinien“ (Abbildung 7d). Nach Drücken einer der Antworttasten verschwand die gesamte Präsentation und es war nur noch der Hintergrund zu sehen (Abbildung 7a). Nach einer kleinen Pause von unterschiedlicher Dauer, z.B. 600 ms, wurde die nächste Figur, beginnend mit der erneuten Fixationsmarke, gezeigt. Dieser Ablauf wiederholte sich bis zum Erreichen der gewünschten Anzahl an Figuren innerhalb eines Zyklus, z.B. 30 Figuren. Nach einem Zyklus konnte der Proband nach seinem Ermessen eine Pause einlegen, durch Drücken einer Taste konnte er anschließend den nächsten Zyklus starten. Der graue Hintergrund war ständig unverändert zu sehen.

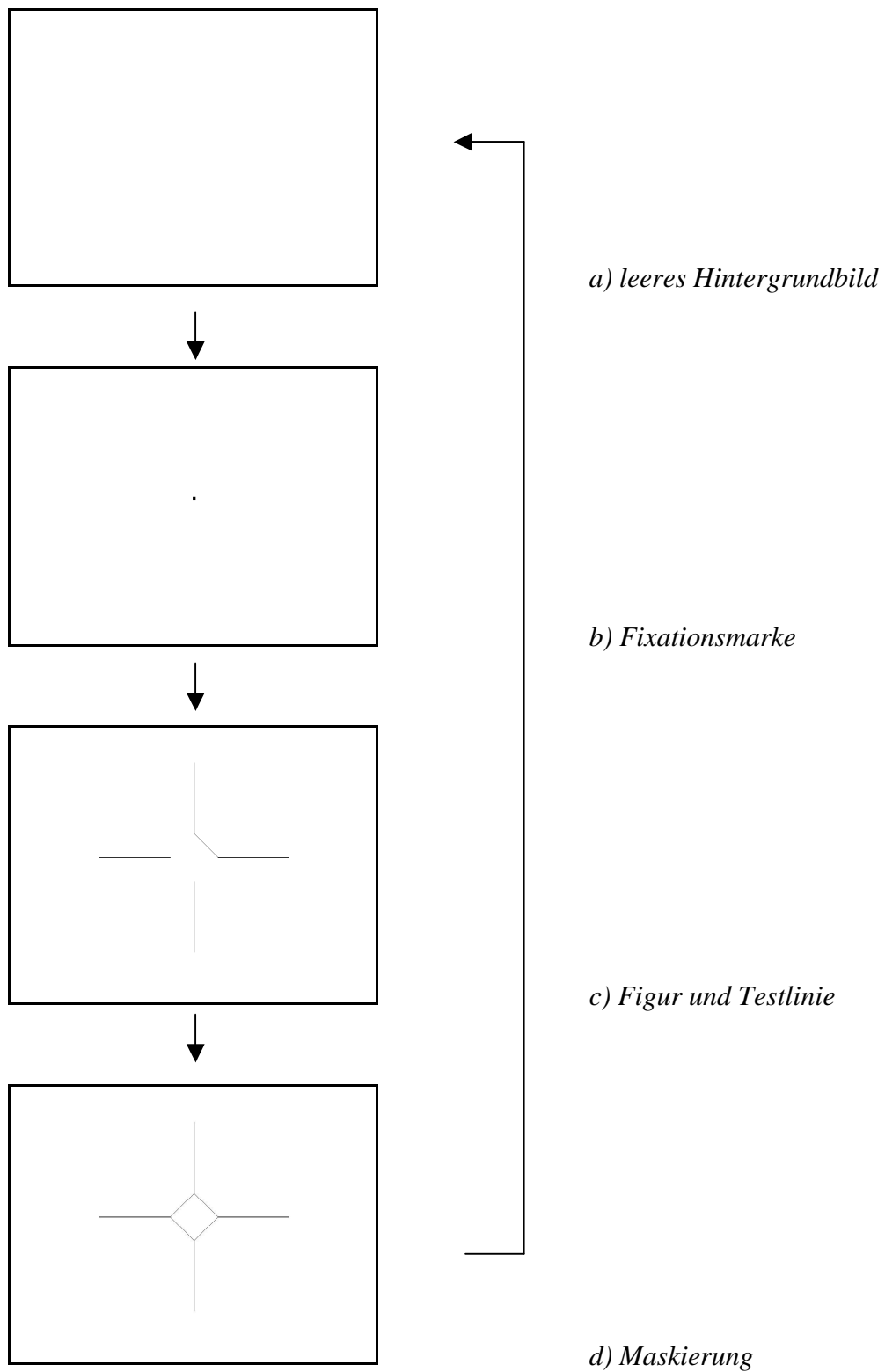


Abbildung 7:

Die Abbildungen a) bis d) zeigen das Ablaufschema der Bildschirmpräsentation.

3.6. Forced-Choice-Prozedur

Bei den psychophysischen Experimenten dieser Arbeit hat der Proband die Aufgabe, die Position einer Testlinie anzugeben. Es gibt vier mögliche Positionen der Testlinie, wobei die Testlinie bei jeder Testfigur erscheint. Dies ist dem Probanden bekannt. Der Proband besitzt daher bei jeder Testfigur vier Antwortmöglichkeiten und muss sich immer für eine Antwort entscheiden. Dies gilt auch dann, wenn der Proband die Position der Testlinie nicht sicher erkennt oder die Testlinie aufgrund des geringen Kontrastes nicht mehr wahrnehmen kann. In diesem Fall muss der Proband dennoch eine Antwort geben, das heißt er wählt die Antwort, wo er die Testlinie „vermutet“ beziehungsweise der Proband muss raten. Es gibt dabei keine Antwortmöglichkeit „nicht sicher erkennbar“ oder „keine Testlinie wahrgenommen“ etc. Dies ist zunächst für den Probanden befremdlich, insbesondere weil der überwiegende Anteil der Testlinien nur sehr schwer oder nicht zu erkennen ist. Viele Probanden werden durch diese Situation verunsichert und zweifeln an ihrer Eignung zu diesem Experiment. Nach 10 präsentierten Figuren wurde deshalb im Hauptexperiment ein Reizmuster mit einer sehr deutliche Testlinie präsentiert, um den Probanden mit einer leicht zu lösenden Aufgabe zu motivieren. Auch ist die Übungsaufgabe und die entsprechende Einweisung für das oben erwähnte Problem sehr wichtig. Dem Probanden wurde erklärt, dass für die Bestimmung einer Wahrnehmungsschwelle eben genau dieser Bereich der Wahrnehmung ausgetestet wird, in dem die Testlinie nur sehr schwer oder nicht zu erkennen ist, und folglich jeder Proband an seine Grenzen der visuellen Wahrnehmung kommt. Ein zu „einfacher“ Test, bei dem die Position der Testlinie eindeutig ist, kann keine Wahrnehmungsschwelle finden. Deshalb kommt jeder Proband im Laufe des Experiments in einen Bereich, in dem er über die Position der Testlinie keine sichere Auskunft geben kann und er raten muss. Es wird also unabhängig von der Sicherheit der Wahrnehmung eine Antwort erzwungen (Forced-Choice-Prozedur). Für die Analyse der Daten und der statistischen Bewertung bedeutet dies einen sehr großen Vorteil. Bei vier möglichen Antworten im Zusammenhang mit dem Fehlen einer Antwortmöglichkeit „keine Testlinie wahrgenommen“ und dem Erzwingen einer Antwort liegt die Wahrscheinlichkeit eine richtige Antwort durch Raten zu geben bei $p=1/n=0,25$. Dies wäre bei einer zusätzlichen Antwortmöglichkeit „keine Testlinie wahrgenommen“

nicht zu bestimmen, ebenso wäre der Bereich, ab wann sich der jeweilige Proband für die Antwortmöglichkeit „keine Testlinie wahrgenommen“ entscheidet nur schwer abzugrenzen. Persönlichkeitseigenschaften würden dann eine große Störgröße darstellen, z.B. würde ein sehr selbstbewusster und ehrgeiziger Proband die Antwortmöglichkeit „keine Testlinie wahrgenommen“ seltener wählen als ein zurückhaltender und unsicherer Proband. Eine Häufigkeitsverteilung dieser Antworten wäre also bei jedem Probanden und unter Umständen bei jedem Experiment unterschiedlich und würde keine sinnvolle Datenanalyse zulassen.

3.7. Anpassung der Testlinienleuchtdichte durch Best-Pest-Prozedur

Die psychophysischen Experimente dieser Arbeit bewegen sich an der Grenze der visuellen Wahrnehmung des Menschen. Die Experimente müssen derartig ausgelegt sein, dass mit möglichst kurzer Versuchszeit und somit möglichst geringer Anzahl an Testfiguren eine Wahrnehmungsschwelle berechnet werden kann. Die Leuchtdichtenschwelle wird in den folgenden Ausführungen unter dem Parameter h_0 geführt. Für die Bestimmung dieser Schwelle ist die Präsentation einer sehr hellen Testlinie, die vom Probanden mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% ($p=1$) erkannt wird, nicht geeignet. Ebenso verhält es sich mit der Präsentation einer sehr dunklen (kontrastarmen) Testlinie, die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Antwort des Probanden erreicht das Rateniveau von 25% ($p=0,25$) bei vier möglichen Antworttasten. Die Forderung, die folglich an die Leuchtdichte der Testlinie gestellt werden muss, ist also möglichst viele Figuren mit einer Testlinie zu zeigen, deren Leuchtdichte sich im Bereich zwischen den oben genannten Leuchtdichtebereichen befindet, also in dem Bereich, in dem die Wahrnehmungsschwelle zu vermuten ist. Diese Leuchtdichte der Testlinie muss für jeden Probanden und für das jeweilige Reizmuster ermittelt werden. Für dieses „adaptive“ Vorgehen wurde eine Best-Pest-Prozedur verwendet.¹

Zunächst werden Testlinien mit einer vorgegebenen Leuchtdichte (z.B. 80 cd/m²) gezeigt, zusammen mit der entsprechenden zu testenden Ehrensteinfigur bzw. Kontrollfigur innerhalb eines Zyklus. Die Leuchtdichte der danach folgenden Testlinien wird vom Rechner automatisch über die Best-Pest-Prozedur je nach richtiger oder falscher Antwort des Probanden ermittelt.

Dies bedeutet, dass sich bei richtiger Antwort, also wenn der Proband die Testlinie erkannt hat oder deren Position erraten hat, die nächste Testlinie in einer geringeren Leuchtdichte und somit in einem geringern Kontrast zum Hintergrund präsentiert wird. Umgekehrt verhält es sich bei einer falschen Antwort des Probanden, die Leuchtdichte der Testlinie wird höher eingestellt, damit vergrößert sich der Kontrast im Vergleich zum Hintergrund. Die Leuchtdichte der Testlinie kann von einem angegebenen Maximum bei Beginn bis zu einem Minimum reichen, das eine Graustufe heller als die

¹ Lieberman HR, Pentland AP. Microcomputer-based estimation of psychophysical thresholds: The best PEST. Behavior Research Methods, Instruments, Computers 1982; 14:21-25.

der Leuchtdichte des Hintergrunds entspricht. Dabei berücksichtigt die Best-Pest-Prozedur alle in einem Zyklus gegebenen Antworten, dies bedeutet, dass sich im Laufe eines Zyklus die Leuchtdichten der nacheinander präsentierten Testlinien immer weniger unterscheiden und sich am Ende des Zyklus in einem sehr kleinen Intervall bewegen. Es gilt zu beachten, dass dies nicht gleichzusetzen ist mit der Berechnung der Wahrnehmungsschwelle der Testlinie. Die Best-Pest-Prozedur liefert in diesem Versuchsaufbau folglich keine Wahrnehmungsschwelle, sondern viele Messdatenpunkte in einem Bereich, in dem die Wahrnehmungsschwelle zu vermuten ist. Außerhalb dieses Bereiches werden nur wenige Datenpunkte gemessen und somit Versuchszeit eingespart. An diese Daten wird zur Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle und Kontrastschwelle eine sigmoide Kurve angepasst (siehe Kapitel 3.8. *Kurvenanpassung und Ermitteln der Leuchtdichtenschwelle*).

3.8. Kurvenanpassung und Ermitteln der Leuchtdichtenschwelle

Die Rate der richtigen Antworten bewegt sich wie bereits oben dargestellt in Abhängigkeit von der Leuchtdichte der Testlinie zwischen 100% ($p=1$) bei sicherer Identifikation der Testlinie und der zufällig richtigen Antwort beim Raten von 25% ($p=0,25$). Zur Ermittlung bzw. zur Abschätzung einer Leuchtdichtenschwelle und Kontrastschwelle wird nun eine psychometrische Funktion $p_{h_0}(h)$ an die Datenpunkte aller Leuchtdichten der Testlinien angepasst. $p_{h_0}(h)$ gibt bei gegebener Leuchtdichtenschwelle h_0 die Rate der korrekten Antworten p als Funktion der Leuchtdichte h der Testlinien an. Folgende Eigenschaften lassen sich dabei beschreiben:

$$p_{h_0}(h) = \begin{cases} 0,25 & h \ll h_0 \\ 1 & h \gg h_0 \end{cases}$$

Folgende logistische Funktion (F) wurde verwendet:

$$F: \quad p_{h_0,s,f}(h) = 0,25 + \frac{0,75 - f}{1 + e^{s(\ln(h_0) - \ln(h))}}$$

Diese Funktion enthält neben der Schwelle der Leuchtdichte h_0 (Leuchtdichtenschwelle) noch zwei weitere Parameter;

- f Die Fehlerrate f erlaubt eine Berücksichtigung eventueller versehentlich falscher Antworten bei einer deutlich überschwelligen Leuchtdichte der Testlinie; für f wurden dabei Werte zwischen 0% und 5% zugelassen.
- s Die Steilheit s ist ein Parameter für die Beschaffenheit des Übergangs zwischen den Bereich mit $p=0,25$ und $p=1$. Je steiler die angepasste Kurve, desto genauer kann eine Schwelle angegeben werden.

Nun wird nach einem Parametersatz (h_0', s', f') gesucht, dessen zugehörige Funktion F die Datenpunkte am besten beschreibt. Dieser Parametersatz wird über ein Maximum-Likelihood-Verfahren bestimmt und beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der diese Schwellenkurve die Daten erklärt.

$$L_{h_0,s,f} = \prod_{i=1}^{n_k} \binom{n(h_i)}{k(h_i)} (p_{h_0,s,f}(h_i))^{k(h_i)} * (1 - p_{h_0,s,f}(h_i))^{(n(h_i) - k(h_i))}$$

- mit k Anzahl der richtigen Antworten
- n Anzahl der Wiederholungen;

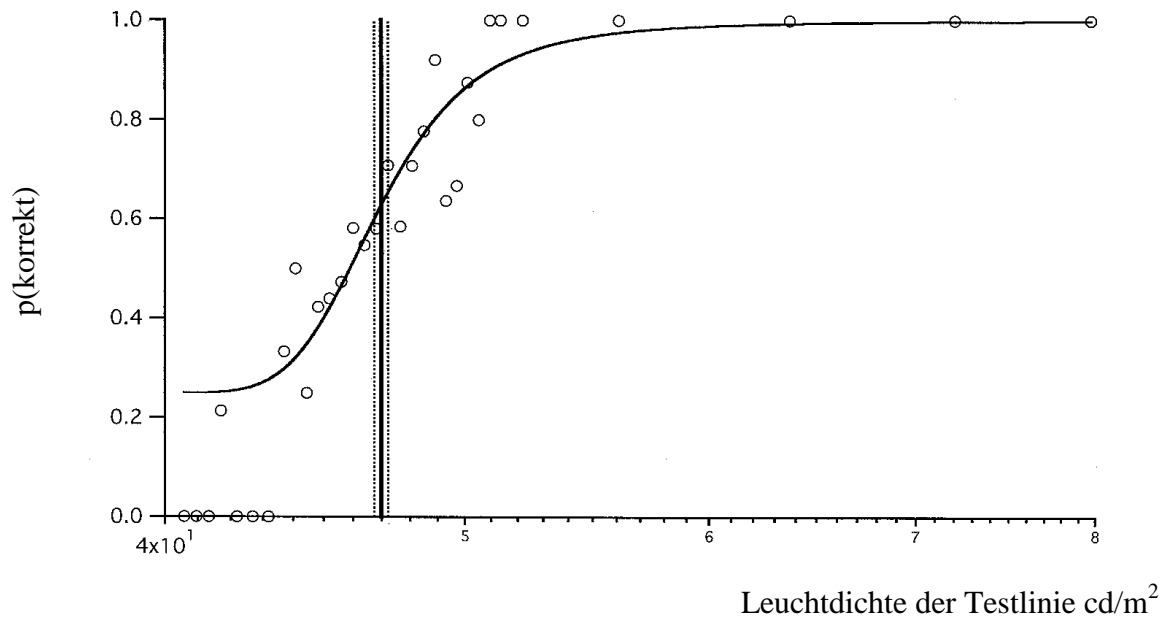


Abbildung 8:

Relative Häufigkeit der korrekten Antworten als Funktion der Leuchtdichte der Testlinie. Die Leuchtdichte ist in logarithmischer Skala bis $8 \times 10 = 80 \text{cd/m}^2$ aufgetragen; der Wendepunkt der sigmoiden Kurve liefert die Leuchtdichtenschwelle, diese ist durch die senkrecht durchgezogene Linie markiert, die gestrichelten Linien bezeichnen den dazugehörigen Fehlerbereich.

Die so berechnete sigmoide Funktion $p_{h_0', s', f'}(h)$ hat ihren Wendepunkt genau zwischen den beiden Extrembereichen mit $p=0,25$ und $p=1-f$, also bei $p=(0,25+1-f)/2=0,625-f/2$. In der graphischen Darstellung hat der Wendepunkt den Y-Wert $Y=0,625-f/2$, der X-Wert ist die gesuchte Leuchtdichtenschwelle (siehe Abbildung 8).

4. Vorversuche

4.1. Experiment 1: Ermittlung der Scheinkontur

4.1.1. Fragestellung

Zur Bestimmung einer Kontrastschwelle entlang der Scheinkontur einer Ehrensteintäuschung war es zunächst interessant zu ermitteln, welche Scheinkontur bzw. Scheinoberfläche im Zentrum einer Ehrensteintäuschung von Probanden wahrgenommen wird. Die Probanden sollten in einem einfachen Versuchsaufbau die wichtigsten denkbaren Figuren Raute, Kreis und Quadrat der wahrgenommenen Scheinkontur zuordnen. Somit wird eine Häufigkeitsverteilung der möglichen wahrnehmbaren Figuren dargestellt.

In erster Linie ist dieser Vorversuch angelegt, um wichtige Entscheidungskriterien für das Hauptexperiment zu liefern. Um die Testzeit pro Proband möglichst zu minimieren, werden im Hauptexperiment die am häufigsten erkannten Figuren der Scheinkontur bzw. Scheinoberfläche verwendet.

4.1.2. Methodik

Zur Ermittlung der wahrgenommenen Scheinkontur wurde im Abstand von 100 cm den Probanden eine Ehrensteintäuschung auf Papier gedruckt präsentiert (Abbildung 9).

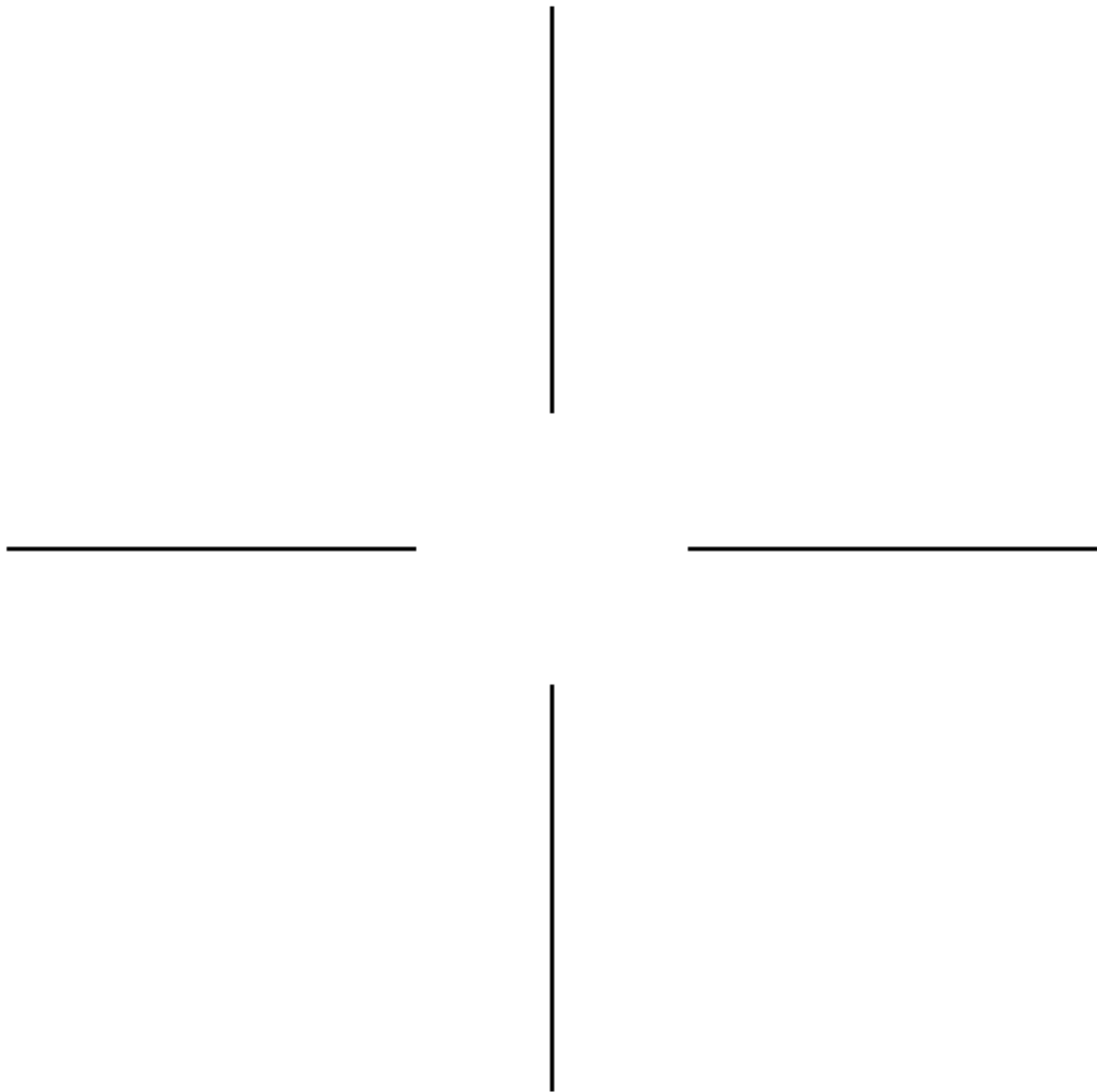


Abbildung 9:

Die Ehrensteintäuschung.

Originalgröße (bei DinA4) entsprechend des Vorversuches. Beim Betrachtungsabstand von 100 cm ergibt sich eine Größe der Linien von je 3 Grad und eine Größe des Zentrums von 2 Grad Sehwinkel. Dies entspricht exakt dem Sehwinkel der Bildschirmpräsentationen im Experiment 2, 3 und 4.

Bei diesem Abstand beträgt die Länge der induzierenden Linien jeweils drei Grad Sehwinkel und ihre Stärke 2,4 Winkelminuten. Die zentrale freie Fläche erscheint in einer Größe von zwei Grad Sehwinkel. Diese Größe ist somit genau der später

verwendeten Bildschirmpräsentation angepasst. Zum Vergleich zu dieser Ehrensteintäuschung wurden parallel dazu drei weitere etwas kleinere auf Papier gedruckte Ehrensteinfiguren gezeigt, in deren Zentrum mit einem weichen Bleistift entweder eine Raute, ein Kreis oder ein Quadrat eingezeichnet waren (siehe Abbildung 10), entsprechend der denkbar möglichen Wahrnehmungen. Geometrisch genau betrachtet handelt es sich bei dieser Raute zwar ebenfalls um ein Quadrat, der Begriff wurde aber von allen Probanden richtig verstanden. Zusätzlich waren diese Figuren beschriftet, um Missverständnisse zu vermeiden. Dies sollte es den Probanden erleichtern, die Fragestellung richtig zu verstehen.

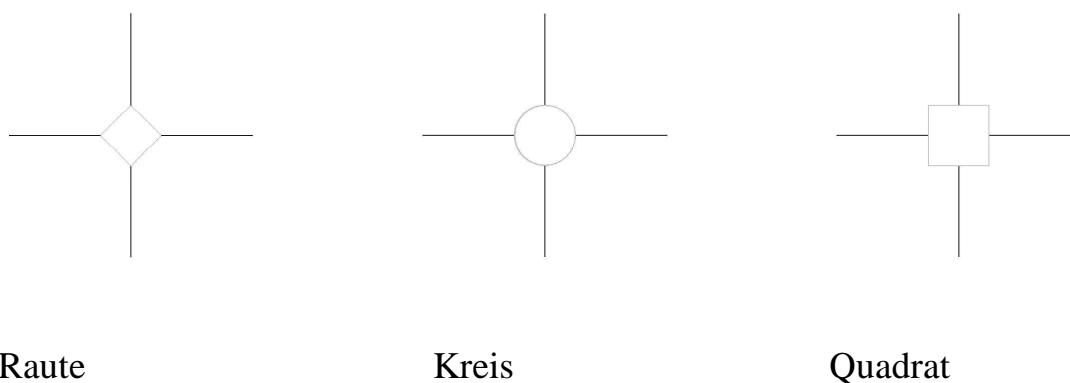


Abbildung 10:

Die vorgegebenen Antwortmöglichkeiten. Die entsprechenden Figuren Raute, Kreis und Quadrat wurden mit einem Bleistift in die Ehrensteintäuschung eingezeichnet.

Die Aufgabe des Probanden war es nun anzugeben, welche Form die wahrgenommene Scheinkontur hat bzw. welche Figur noch am ehesten zutrifft.

Es wurden insgesamt 100 Probanden getestet. Die Probanden wurden in folgende Gruppen eingeteilt: Frauen und Männer, diese wiederum in die Altersklassen 12-20 Jahre, 20-30 Jahre, 30-60 Jahre und über 60 Jahre. Dadurch entstehen 8 Gruppen. Durch die zufällige Auswahl der Probanden sind die einzelnen Gruppen unterschiedlich in Bezug auf die Probandenanzahl.

Es wurden ursprünglich nur die Antworten „Raute“, „Kreis“ und „Quadrat“ vorgegeben, allerdings zeigte sich, dass von den 100 Probanden 14 keine Scheinkontur trotz

Bemühen wahrnehmen konnten. Deshalb wurde eine vierte Antwortmöglichkeit „keine Angabe“ eingeräumt. Diese Antwortmöglichkeit wurde allerdings den Probanden nicht vorgegeben, sondern erst notiert, wenn der Proband nicht einmal die am ehesten für ihn zutreffende Figur trotz Bemühen benennen konnte.

An diesem Experiment nahmen 48 Frauen und 52 Männer teil (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3). Die Gruppenstärken der Altersklassen sind wie bereits oben erwähnt unterschiedlich, wobei aber im Vergleich zwischen den jeweiligen Gruppen der Frauen und der Männer ähnliche Teilnehmerzahlen erreicht wurden.

4.1.3. Ergebnis

	12-20 Jahre	20-30 Jahre	30-60 Jahre	>60 Jahre	Gesamt
Raute		3	3	2	8
Kreis	1	6	14	11	32
Quadrat		2	1	2	5
keine Angabe			1	2	3
Gruppenstärke	1	11	19	17	48
p (Chi-Quadrat-Test)	0,368	0,307	<0,001	0,005	<<0,001

Tabelle 2:

Die Ergebnisse der weiblichen Probanden. Der Chi-Quadrat-Test gibt in der jeweiligen Gruppe die Wahrscheinlichkeit an, in der dieses Ergebnis durch eine zufällige Verteilung entstehen kann.

Von den 48 teilnehmenden Frauen gaben 8 die Antwort „Raute“, 32 die Antwort „Kreis“ und 5 die Antwort „Quadrat“. 3 Frauen konnten keine Scheinkontur wahrnehmen.

Dabei wird in jeder der vier Altersklassen der Kreis am häufigsten wahrgenommen und stellt mit insgesamt 67% die am häufigsten wahrgenommene Figur bei den Frauen dar. Die Raute wurde von 17% und das Quadrat von 10% der Frauen wahrgenommen (siehe auch Tabelle 4).

	12-20 Jahre	20-30 Jahre	30-60 Jahre	>60 Jahre	Gesamt
Raute		2	7	4	13
Kreis	4	5	10	8	27
Quadrat				1	1
keine Angabe		2	2	7	11
Gruppenstärke	4	9	19	20	52
p (Chi-Quadrat-Test)	0,018	0,066	0,010	0,058	<<0,001

Tabelle 3:

Die Ergebnisse der männlichen Probanden. Der Chi-Quadrat-Test gibt in der jeweiligen Gruppe die Wahrscheinlichkeit an, in der dieses Ergebnis durch eine zufällige Verteilung entstehen kann.

Von den 52 teilnehmenden Männern gaben 13 die Antwort „Raute“, 27 die Antwort „Kreis“ und nur ein Mann die Antwort „Quadrat“. 11 Männer konnten keine Scheinkontur wahrnehmen.

Dabei wird ebenfalls in jeder der vier Altersklassen wie bei den Frauen der Kreis am häufigsten wahrgenommen und stellt mit insgesamt 52% auch die am häufigsten wahrgenommene Figur bei den Männern dar. Die Raute wurde von 25% und das Quadrat von nur 2% der Männer wahrgenommen. Auffallend ist die hohe Anzahl an Probanden, die keine Scheinkontur wahrnehmen konnten. Sieben von diesen elf Probanden befinden sich in der Altersgruppe über 60 Jahre. In dieser Altersgruppe der Männer wurde also von nur 65% der Probanden überhaupt eine Scheinkontur wahrgenommen.

	Frauen		Männer		Gesamt	
	absolut	prozentual	absolut	prozentual	absolut	prozentual
Raute	8	17%	13	25%	21	21%
Kreis	32	67%	27	52%	59	59%
Quadrat	5	10%	1	2%	6	6%
keine Angabe	3	6%	11	21%	14	14%
Gesamt	48	100%	52	100%	100	100%

Tabelle 4:

Übersicht über die beiden Gruppen Frauen und Männer sowie über das Gesamtergebnis. Die Darstellung zeigt jeweils absolute Zahlen und gerundete prozentuale Anteile.

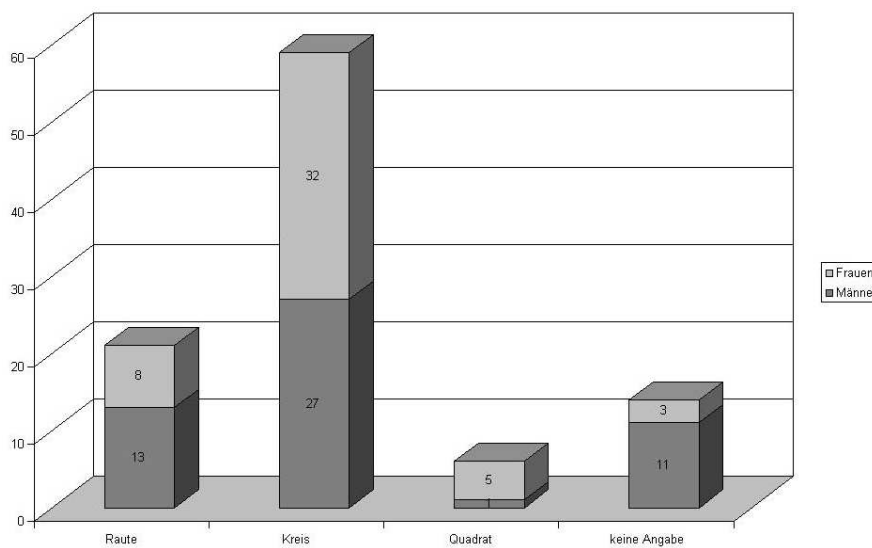


Abbildung 11:

Graphische Darstellung der Gesamtergebnisse. Im Säulendiagramm sind die absoluten Zahlen der Gruppen Frauen und Männer eingetragen.

Im Gesamtergebnis wurde ebenfalls am häufigsten der Kreis in der Ehrensteinfigur als Form der Scheinkontur wahrgenommen. 59 Probanden (59%) gaben diese Antwort. Die Raute wurde von 21 Probanden (21%) wahrgenommen. 6% der Probanden nahmen ein

Quadrat wahr. 14% der Probanden konnten keine Figur erkennen (Tabelle 4 und Abbildung 11).

Dieses Ergebnis wurde durch den Chi-Quadrat-Test im Paarvergleich der Reizmuster analysiert. Dabei zeigt sich in den Paarvergleichen Kreis-Raute und Kreis-Quadrat ein $p < 0,001$. Dies bestätigt stochastisch signifikant den bereits gewonnen Eindruck, dass der Kreis am häufigsten in diesem Experiment als Scheinkontur in der Ehrensteintäuschung wahrgenommen wurde (Tabelle 5).

	Frauen	Männer	Gesamt
Kreis- Raute	<0,001	0,086	<0,001
Kreis-Quadrat	<<0,001	<<0,001	<<0,001
Raute-Quadrat	0,707	0,006	0,016

Tabelle 5:

Chi-Quadrat-Test im Paarvergleich der Reizmuster.

Der Chi-Quadrat-Test gibt im jeweiligen Paarvergleich der Reizmuster die Wahrscheinlichkeit an, in der dieses Ergebnis durch eine zufällige Verteilung entstehen kann.

4.1.4 Diskussion

Das Experiment 1 sollte in einem möglichst einfachen Versuchsaufbau eine Richtlinie liefern, die es erlaubt zu beurteilen, welche Formen der Scheinkontur und Scheinoberfläche im Zentrum einer Ehrensteintäuschung wahrgenommen werden. Dabei wurde der Versuchsaufbau auf eine klare Aufgabe beschränkt, es bestand lediglich eine einfache Auswahlaufgabe. Ebenso wurde auf weitere theoretisch mögliche wahrnehmbare Figuren (z.B. Sechseck, Achteck, etc.) in dieser Auswahl verzichtet. Das eindeutige Ergebnis gibt wertvolle Hinweise für das Hauptexperiment. So zeigt sich z.B., dass Kreis und Raute mit 80% zusammen die am häufigsten wahrgenommenen Figuren darstellen. Geht man ferner davon aus, dass es sich bei diesem Experiment um eine repräsentative Stichprobe handelt, kann man sich im Hauptexperiment darauf beschränken, die weiteren Experimente auf der Grundlage der Kreis- und der Rautenkontur durchzuführen. Die Wahrnehmung des Quadrates kann dann bei der Bildschirmpräsentation vernachlässigt werden, da nur 6% der Probanden ein Quadrat wahrgenommen haben. Bei der im Hauptversuch kleineren Anzahl an Probanden kann der bei vergleichbarer Stichprobe erwartete Anteil an Probanden, die ein Quadrat wahrnehmen, vernachlässigt werden.

Die übrigen 14% der Probanden konnten keine Scheinkontur erkennen. Dieser Anteil an Probanden ist sehr hoch. Die Methodik des Experiments sah nicht vor, eine Begründung für das Wahrnehmen bzw. Nicht-Wahrnehmen zu erarbeiten, so dass nicht beurteilt werden kann, warum keine Figur erkannt wurde oder warum besonders in der Altersgruppe über 60 Jahre der Männer auffallend viele Probanden keine Kontur erkannten. Missverständnisse und falsch verstandene Aufgabenstellung können aufgrund des sehr einfachen Versuchsaufbau und der klaren Aufgabenstellung praktisch ausgeschlossen werden, besonders weil die Probanden bei Unklarheit über die Aufgabe jederzeit nachfragen konnten. Durch sehr gute Ergebnisse bei den Frauen gleichen Alters kann man altersbedingte Komponenten als Ursache dafür vernachlässigen, wenn man als Grundlage annimmt, dass kein prinzipieller Unterschied bei den Geschlechtern bezüglich dieser Wahrnehmung besteht. Alle Probanden nahmen freiwillig an diesem Experiment teil, somit kann man auch davon ausgehen, dass bei den Probanden eine Motivation vorlag und sich der einzelne Proband bemühte, eine Figur wahrzunehmen.

Für die Auswahl der zu präsentierenden Figuren und für die Versuchsbedingungen im Hauptexperiment kann dieser Anteil der Probanden, die keine Figur erkennen konnte auch keine verwertbare Information liefern.

Schließlich muss noch bemerkt werden, dass es sich bei diesem Experiment um einen sehr einfachen Versuchsaufbau handelte. Beispielsweise wurde der Abstand der Probanden von der Präsentation vom Autor geschätzt, es wurde auch bei keinem Proband die Sehschärfe bestimmt. Durch diesen einfachen Aufbau können damit zwar methodische Fehler nicht ausgeschlossen werden, es galt aber in erster Linie eine Einschätzung der Häufigkeitsverteilung zu ermitteln, bei der gewisse Abweichungen durchaus toleriert werden können.

4.2. Experiment 2: Schwellenanpassung

4.2.1. Fragestellung

In diesem Experiment soll die Schwellenanpassung wie in Kapitel 3.8. *Kurvenanpassung und Ermitteln der Leuchtdichtenschwelle* besprochen anhand einer sehr hohen Anzahl an Wiederholungen ($n=1000$) für jeweils zwei Reizmuster überprüft werden. Mit der verwendeten Likelihoodfunktion sollte dabei eine Überprüfung des Absolutwertes der Leuchtdichte, des natürlichen logarithmischen Wertes der Leuchtdichte, des Absolutwertes des Kontrastes sowie des natürlichen logarithmischen Wertes des Kontrastes erfolgen. Es soll also unter diesen vier Schwellenkurven mit Hilfe der Likelihoodfunktion diejenige Schwellenkurve mit der besten Passung ermittelt werden.

Für dieses Experiment ist eine Versuchsperson ausreichend, da kein Effekt der Scheinkontur bzw. der Reizmuster untersucht wird, sondern möglichst konstante Wiederholungen erreicht werden sollen. Alle weiteren Parameter entsprechen den Einstellungen des Hauptversuchs.

4.2.2. Methodik

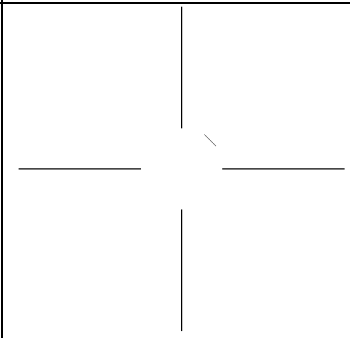
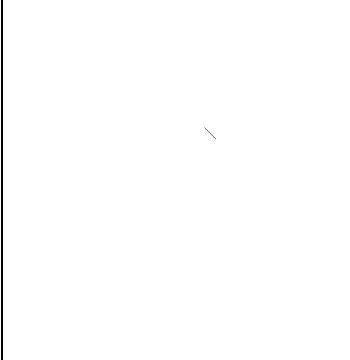
Die methodischen Grundlagen zu diesem Experiment wurden bereits im allgemeinen Methodikteil besprochen. In diesem Kapitel werden nur die speziellen Parameter aufgeführt.

Proband:

Es wurde ein männlicher Proband im Alter von 28 Jahren getestet (Autor). Dieser Proband hatte einen normalen Visus und war mit derartigen Experimenten vertraut.

Reizmuster:

Folgende zwei Testfiguren wurden programmiert:

	Figurentyp	Beschreibung	Beispiel
1.	Ehrenstein-täuschung	Länge der induzierenden Linien jeweils 3 Grad Schwinkel und ihre Stärke 2,4 Winkelminuten. Die zentrale freie Fläche erscheint in einer Größe von zwei Grad Schwinkel	
2.	Kontrollfigur2: Keine Linien	Technisch betrachtet wird ebenfalls eine Ehrensteintäuschung gezeigt, diese besitzt jedoch keine Linien, das heißt es wird keine sichtbare Figur gezeigt, es ist dann lediglich die Testlinie und der graue Hintergrund zu sehen	

Hintergrundsleuchtdichte:	39,8 cd/m ²
Leuchtdichte der Inducer:	80,0 cd/m ²
Leuchtdichte der ersten Testlinie:	80,0 cd/m ²
Position der Testlinie:	entlang der Kreiskontur
Länge der Testlinie:	0,466° = 1/3 der maximalen Länge
Stärke der Testlinie:	0,8 Winkelminuten
Darbietungszeit der Testlinie:	200 ms
Anzahl der Testfiguren:	2 verschiedene Reizmuster Je 20 Zyklen mit je 50 Figuren = 1000 Figuren
Übungsaufgabe:	keine (Proband war mit diesen Aufgaben vertraut)
Monitor:	Grautöne Auflösung 1024x768 Pixel Abstand 140 cm

4.2.3. Ergebnis

Abbildung 12 zeigt die korrekten Antworten (schwarze Punkte) und die falschen Antworten (weiße Punkte) in Abhängigkeit der Leuchtdichte (Y-Achse). Die X-Achse zeigt den chronologischen Ablauf und die Anzahl der Testfiguren. Eine detaillierte Beschreibung dieser Grafikart wird unter 5.3. *Ergebnis* vorgenommen. Bereits aus der grafischen Darstellung ist die homogene Datenlage zu erkennen. Dabei zeigte sich, dass kein entscheidender Unterschied in der Passung der Schwellenkurven mit Hilfe der Likelihoodfunktion zu finden war. Dies bedeutet, alle vier Schwellenkurven wären zur Beschreibung der Daten gleichermaßen geeignet. Von den meisten Arbeitsgruppen wird der natürliche Logarithmus des Kontrastes verwendet, für die Experimente 3 und 4 wurde deshalb ebenfalls diese Funktion zur Bestimmung der Schwellenkurve verwendet.

Eine statistische Analyse dieser Daten aus dem Experiment 2 ist nicht sinnvoll.

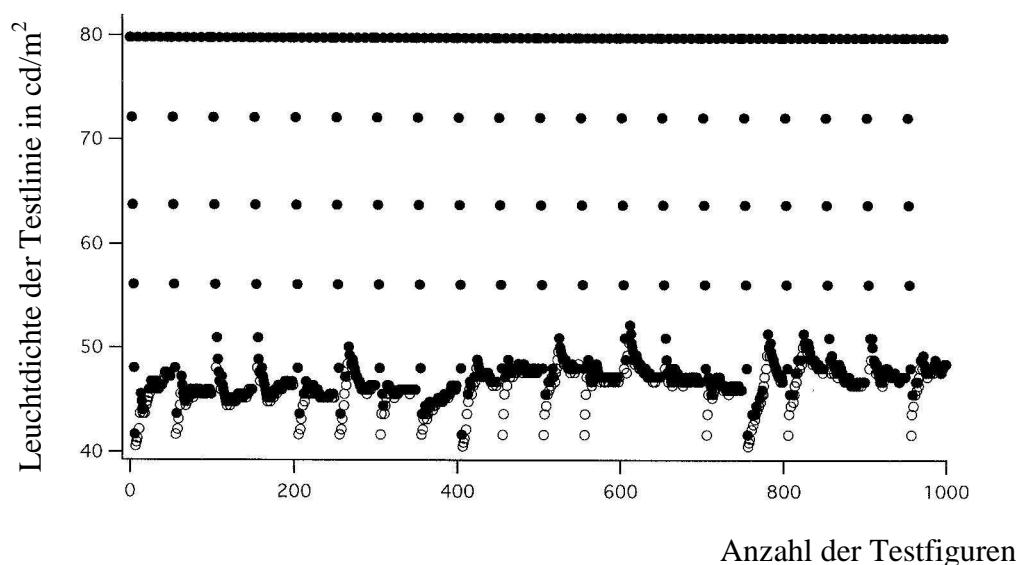


Abbildung 12:

Darstellung der korrekten Antworten im zeitlichen Verlauf und in Bezug auf die Leuchtdichte der Testlinie (E_{kreis}); die 20 Zyklen ergeben 1000 Testfiguren; die schwarzen Punkte zeigen die korrekten Antworten, die weißen Punkte die falschen Antworten.

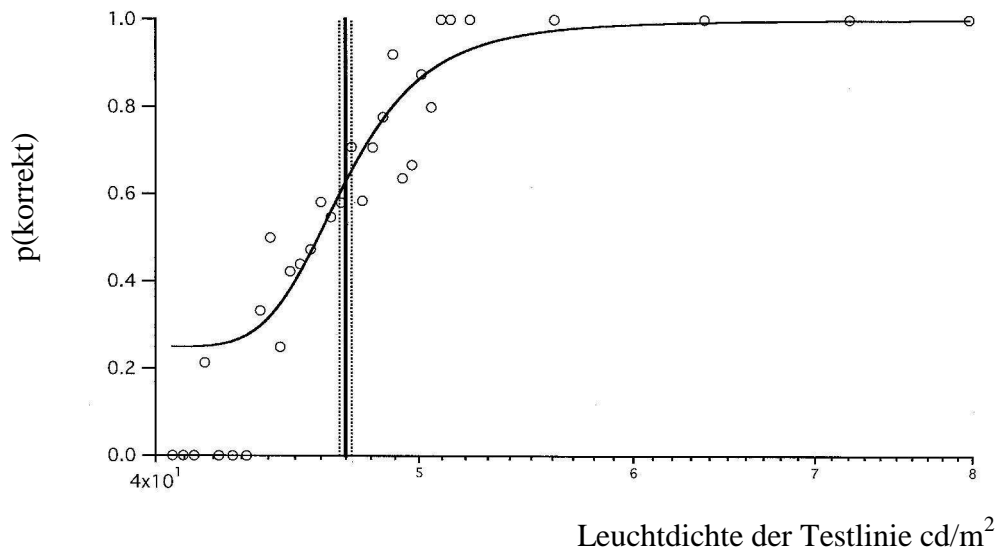


Abbildung 13:

Relative Häufigkeit der korrekten Antworten als Funktion der Leuchtdichte der Testlinie; die Graphik zeigt die Funktion aus Kapitel 3.8.

4.2.4. Diskussion

Das Experiment konnte verdeutlichen, dass die gewählte Funktion zur Kurvenanpassung und Bestimmung einer Kontrastschwelle geeignet ist. Dabei zeigten sich mehrere gleichwertig geeignete Funktionen. Die in Kapitel 3.8. *Kurvenanpassung und Ermitteln der Leuchtdichtenschwelle* gezeigte Funktion wird von den meisten Arbeitsgruppen zur Bestimmung der Kontrastschwelle verwendet.¹ Sie ist zur Beschreibung der Daten dieser Experimente geeignet und wird deshalb zur Kurvenanpassung in den Experimenten 3 und 4 eingesetzt. Es gilt zudem zu beachten, dass alle Experimente einen Vergleich zwischen den einzelnen Reizmustern darstellen. Dies bedeutet, dass die Absolutwerte der Kontrastschwelle und damit der Einsatz einer anderen Kurvenanpassung von untergeordneter Rolle sind, da die Daten immer in Relation bewertet werden. Wichtig dabei ist, dass eine einheitliche Bestimmung der Schwellen verwendet wird und diese im Laufe der Arbeit beibehalten wird.

¹ Harvey L. Efficient estimation of sensory thresholds. Behavior Research Methods, Instruments, Computers 1986; 18:623-632.

4.3. Experiment 3: Bestimmung der Kontrastschwelle einer Testlinie entlang der Rautenkontur der Ehrensteintäuschung

4.3.1. Fragestellung

In diesem Experiment sollen wichtige Fragen für das Hauptexperiment geklärt werden. Erstens soll der allgemeine Versuchsaufbau und die verwendete Software erprobt werden. Dabei ist besonders interessant, ob und inwieweit eine Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie entlang der Rautenkontur der Ehrensteintäuschung mit diesem Versuchsaufbau nachweisbar ist.

Zweitens sollen verschiedene Darbietungszeiten erprobt werden. Die erste Darbietungszeit ist von unbegrenzter Dauer, das heißt der Proband bestimmt selbst die Betrachtungszeit. Er drückt nach seinem zeitlichen Ermessen eine Antworttaste und beendet damit die Präsentation von Figur und Testlinie. Die zweite Darbietungszeit wird so kurz gewählt, dass eine Sakkade in diesem Zeitraum nicht möglich ist.

Drittens sollen die Figuren in zwei unterschiedlichen Kontrastpolaritäten getestet werden, das heißt ein Teil der Figuren ist heller als der Hintergrund, die Leuchtdichte der anderen Figuren ist geringer als der Hintergrund.

Viertens sollen zwei Kontrollfiguren in den Versuchen zum Einsatz kommen. Neben der Kontrolle ohne Inducer findet eine weitere Figur Verwendung. Diese *Kontrollfigur 1, 4P* ist eine Sonderform der Ehrensteintäuschung. Die Linien dieser Figur sind auf vier Punkte reduziert und diese Figur erzeugt weder eine Scheinkontur noch eine Scheinoberfläche. Diese Kontrollfigur soll eine Aussage ermöglichen, ob speziell das Vorhandensein einer Scheinkontur zur Reduktion einer Kontrastschwelle einer Testlinie notwendig ist, oder ob auch ein Inducer ohne Scheinkontur eine Kontrastschwelle verändern kann.

4.3.2. Methodik

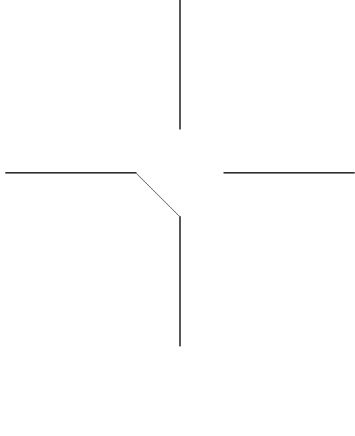
Die methodischen Grundlagen zu diesem Experiment wurden bereits im allgemeinen Methodikteil besprochen. In diesem Kapitel werden nur die speziellen Parameter aufgeführt.

Probanden:

Es wurden insgesamt 7 Probanden im Alter von 25-40 Jahren getestet. 5 Probanden waren männlich und 2 Probanden waren weiblich. Alle Probanden hatten einen normalen Visus, gegebenenfalls durch Korrektur erreicht. Zwei der Probanden waren mit derartigen Experimenten vertraut.

Reizmuster:

Folgende acht Testfiguren wurden programmiert:

	Figurentyp und Kurzformel	Beschreibung	Beispiel
1.	Ehrenstein-täuschung E_80/D100	Länge der induzierenden Linien jeweils 3 Grad Sehwinkel und ihre Stärke 2,4 Winkelminuten. Die zentrale freie Fläche erscheint in einem Durchmesser von zwei Grad Sehwinkel; Leuchtdichte Inducer: 80 cd/m^2 Darbietungszeit Testlinie: 100 ms	
2.	Ehrenstein-täuschung E_80/Du	wie bei 1.; Leuchtdichte Inducer: 80 cd/m^2 Darbietungszeit Testlinie: unbegrenzt	wie bei 1.
3.	Ehrenstein-täuschung E_20/D100	wie bei 1.; Leuchtdichte Inducer: 20 cd/m^2 Darbietungszeit Testlinie: 100 ms	ähnlich wie bei 1.

4.	Kontrollfigur1: Vier Punkte 4P_80/D100	Eine Sonderform der Ehrenstein- täuschung, bei der die induzierenden Linien auf eine minimale Länge reduziert wurden, so dass sie wie vier Punkte aussehen. Die zentrale freie Fläche hat die gleiche Größe wie oben Leuchtdichte Inducer: 80 cd/m ² Darbietungszeit Testlinie: 100 ms	
5.	Kontrollfigur1: Vier Punkte 4P_80/Du	wie bei 4.; Leuchtdichte Inducer: 80 cd/m ² Darbietungszeit Testlinie: unbegrenzt	wie bei 4.
6.	Kontrollfigur1: Vier Punkte 4P_20/D100	wie bei 4.; Leuchtdichte Inducer: 20 cd/m ² Darbietungszeit Testlinie: 100 ms	ähnlich wie bei 4.
7.	Kontrollfigur2: Keine Linien K_D100	Keine sichtbare Figur, es ist lediglich die Testlinie und der graue Hintergrund zu sehen Leuchtdichte Inducer: - Darbietungszeit Testlinie: 100 ms	
8.	Kontrollfigur2: Keine Linien K_Du	wie bei 7.; Leuchtdichte Inducer: - Darbietungszeit Testlinie: unbegrenzt	wie bei 7.

Allgemeine Parameter:

Hintergrundsleuchtdichte: 40,0 cd/m²

Leuchtdichte der ersten Testlinie: 60,0 cd/m²

Position der Testlinie: entlang der Rautenkontur

Länge der Testlinie:	1,4°=maximale Länge, dies bedeutet, die Testlinie verbindet zwei Linien der Ehrensteintäuschung an deren zentralem Ende
Stärke der Testlinie:	2,4 Winkelminuten
Darbietung der Testfiguren:	Je 3 Zyklen mit je 45 Figuren = 135 Figuren
Übungsaufgabe:	alle 8 Reizmuster Je 1 Zyklus mit 45 Figuren
Monitor:	Grautöne Auflösung 640x480 Pixel Abstand 70 cm

4.3.3. Ergebnis

Alle 7 Probanden kamen mit der gestellten Aufgabe zurecht. Zunächst wurde die Leuchtdichtenschwelle für jeden Probanden und Reizmuster bestimmt. Für die weitere Analyse wird wie beim Hauptexperiment der natürliche Logarithmus der Kontrastschwelle verwendet.

natürlicher Logarithmus Kontrastschwelle = $\ln[(S-H)/(S+H)]$;

wobei S Schwelle der Leuchtdichte der Testlinie [cd/m^2]

H Leuchtdichte des Hintergrunds [cd/m^2];

Aus diesem Datensatz werden die allgemeinen Parameter der statistischen Analyse bestimmt wie z.B. Mittelwert, Standardabweichung, Standardfehler des Mittelwertes und Varianz.

	E_80 /D100	4P_80 /D100	K_D100	E_80 /Du	4P_80 /Du	K_Du	E_20 /D100	4P_20 /D100
Mittelwert	-3,5071	-3,5368	-3,2687	-4,4042	-4,5817	-3,9784	-3,3489	-3,2063
Standard- abweichung	0,3486	0,3362	0,2052	0,1964	0,1810	0,2100	0,3136	0,3026
Standardfehler des Mittelwertes	0,1318	0,1271	0,0776	0,0742	0,0684	0,0794	0,1185	0,1144
Varianz	0,1215	0,1130	0,0421	0,0386	0,0328	0,0441	0,0983	0,0916

Tabelle 6:

Deskriptive statistische Auswertung.

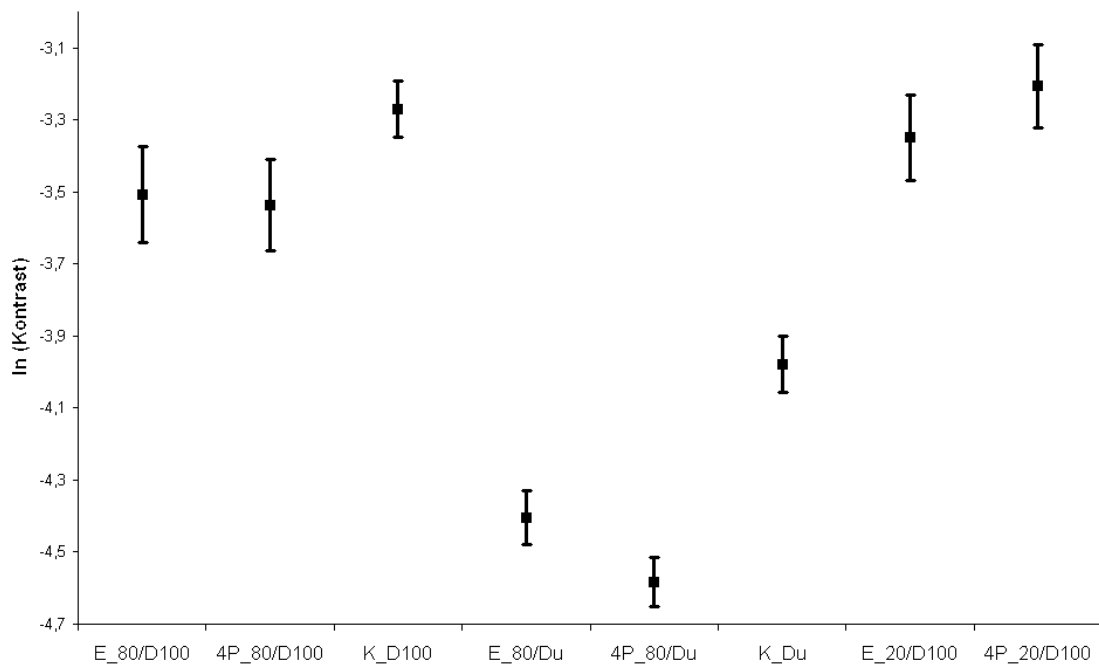


Abbildung 14:

Mittelwerte und Standardfehler des Mittelwertes des natürlichen Logarithmus der ermittelten Kontrastschwelle aller Probanden (n=7) in Abhängigkeit vom Reizmuster. Die Ehrensteintäuschung und die Kontrollfigur 1 erreichen eine signifikante Reduktion der Kontrastschwelle gegenüber der Kontrollfigur 2.

Zur Datenanalyse wurde eine Anova mit zwei Faktoren verwendet. Der erste Faktor war die Darbietungszeit, also unbegrenzte Darbietung und durch Maskierung auf 100ms begrenzte Darbietung. Der zweite Faktor waren die Inducer (E_80/D100, E_80/Du, E_20/D100, 4P_80/D100, 4P_80/Du, 4P_20/100, K_D100, K_Du). Entsprechend den signifikanten Ergebnissen wurde ein Post-hoc Scheffé-Test bestimmt. Dabei zeigte sich folgendes Ergebnis:

Die Ehrensteintäuschung (E_80/D100, E_80/Du, E_20/D100) kann in diesem Experiment die Kontrastschwelle einer Testlinie signifikant im Vergleich zur Kontrollfigur 2 (keine Linien, K_D100, K_Du) senken ($p < 0,0001$).

Die Kontrollfigur 1 (vier Punkte, 4P_80/D100, 4P_80/Du, 4P_20/100) kann ebenfalls die Kontrastschwelle einer Testlinie signifikant im Vergleich zur Kontrollfigur 2 (keine Linien, K_D100, K_Du) senken ($p < 0,0001$).

Zwischen der Ehrensteintäuschung (E_80/D100, E_80/Du, E_20/D100) und der Kontrollfigur 1 (4P_80/D100, 4P_80/Du, 4P_20/100) besteht dabei kein signifikanter Unterschied ($p = 0,125$).

Bei unbegrenzter Darbietungszeit werden signifikant geringere Kontrastschwellen erreicht im Vergleich zu den Reizmustern mit Maskierung der Testlinien nach 100 ms ($p < 0,0001$).

Bei den Figuren mit gleicher Kontrastpolarität in Bezug zur Testlinie (E_80/D100, 4P_80/D100) werden geringere Kontrastschwellen erreicht im Vergleich zu den Figuren mit gegensinniger Kontrastpolarität in Bezug zur Testlinie (E_20/D100, 4P_20/D100). Dieses Ergebnis ist jedoch nicht signifikant ($p = 0,145$).

4.3.4. Diskussion

Die Kontrastschwelle einer Testlinie entlang der Rautenkontur der Ehrensteintäuschung kann in diesem Experiment signifikant gesenkt werden im Vergleich zu einer Kontrollfigur 2 (K, keine Linien). Allerdings zeigt die Kontrollfigur 1 (4P, vier Punkte) ebenfalls eine signifikante Reduktion der Kontrastschwelle gegenüber der Kontrollfigur 2, obwohl diese Figur keine Scheinkontur erzeugen kann. Ein signifikanter Unterschied in der Reduktion der Kontrastschwelle zwischen der Ehrensteintäuschung und der

Kontrollfigur 1 ist dabei nicht festzustellen. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Ehrensteintäuschung und die Kontrollfigur eine gemeinsame Eigenschaft besitzen, die eine Lokalisation der Testlinie im Vergleich zur Kontrollfigur 2 wesentlich erleichtert. Diese Eigenschaft ist unabhängig von einer Scheinkontur, da die Kontrollfigur 1 keine Scheinkontur induzieren kann. Da die Testlinie bei diesem Experiment in voller Länge gezeigt wurde, also als Verbindung der Linien der Ehrensteintäuschung im Bereich der zentralen Lücke bzw. als Verbindung der Punkte der *Kontrollfigur 1*, ist es denkbar, dass der räumliche Anhaltspunkt der Figuren die Lokalisation der Testlinie erleichtert. Diese Erleichterung fehlt bei der *Kontrollfigur 2*, bei dieser Präsentation ist lediglich die Testlinie vor dem grauen Hintergrund zu sehen. Das Postulat einer Summation unterschwelliger Kontrastsignale entlang der rautenförmigen Scheinkontur der Ehrensteintäuschung kann somit durch dieses Experiment nicht bestärkt werden.

Bei unbegrenzter Darbietungszeit der Testfigur und Testlinie werden im Vergleich zur begrenzten Darbietungszeit mit 100 ms und anschließender Maskierung signifikant niedrigere Kontrastschwellen erreicht. Dabei bleibt aber das oben beschriebene Verhältnis in der Reduktion der Kontrastschwellen zwischen den verschiedenen Reizmustern erhalten und bringt deshalb in Bezug auf den zu untersuchenden Haupteffekt keine weitere Information. Zudem wird durch eine unbegrenzte Darbietungszeit die gesamte Versuchszeit stark erhöht. Im Hauptversuch (Experiment 4) wird deshalb eine begrenzte Darbietungszeit verwendet.

In diesem Experiment wurden zusätzlich verschiedene Kontrastpolaritäten der Ehrensteintäuschung und der Kontrollfigur 1 getestet, wobei der Kontrast zum Hintergrund dabei unverändert war. Die Kontrastpolarität der Testlinie wurde bei allen Reizmustern beibehalten (helle Testlinie im Vergleich zum grauen Hintergrund). Dabei bleibt wiederum das oben beschriebene Verhältnis in der Reduktion der Kontrastschwellen zwischen den verschiedenen Reizmustern erhalten und bringt folglich in Bezug auf den zu untersuchenden Effekt keine weitere Information. Im Hauptversuch (Experiment 4) wird deshalb nur eine Kontrastpolarität der Reizmuster untersucht.

Einige der Probanden konnten die Testlinie bereits wenige Graustufen heller als der Hintergrund lokalisieren. Dies entspricht einer Wahrnehmung des kleinsten möglichen Kontrastes, der bei diesem Versuchsaufbau präsentiert werden konnte. Dies bedeutet

auch, dass der Bereich, in dem die Versuchsperson keine Testlinie erkennen kann und somit die Rate der korrekten Antworten das Rateniveau von 25% erreicht, sehr klein war oder vollständig fehlte. Eine sinnvolle Kurvenanpassung bezüglich der zu ermittelnden Kontrastschwelle wird dadurch erschwert oder besitzt einen größeren Fehlerbereich. Dies soll im Hauptexperiment durch eine kleinere Testlinie bei unveränderten Reizmustern verbessert werden.

5. Hauptversuch:

Experiment 4: Bestimmung der Kontrastschwelle einer Testlinie entlang der Rauten- und Kreiskontur der Ehrensteintäuschung

5.1. Fragestellung

Dieses Experiment bildet das Kernstück dieser Arbeit.

In diesem Experiment soll getestet werden, ob die Kontrastschwelle entlang der Rauten- und Kreiskontur der Ehrensteintäuschung im Vergleich zu Kontrollfiguren signifikant herabgesetzt wird. Dabei werden die Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Experiment 2 eingebracht. Die Testlinie wird nicht in voller Länge, sondern in 1/3 der maximalen Länge gezeigt. Zusätzlich wird jetzt in diesem Experiment auch entlang der Kreiskontur getestet. Die Testlinie wurde in ihrer Stärke reduziert, um den Bereich, in der die Versuchsperson auf das Raten angewiesen ist, zu vergrößern, da dieser im Vorversuch bei einigen Versuchspersonen nur aus einer Leuchtdichtestufe bestand. Zu diesem Zweck wird zum einen die Auflösung des Monitors erhöht (1024x768 Pixel) und zum anderen der Abstand der Versuchsperson vom Monitor auf 140 cm verdoppelt. Um die Reizmuster im gleichen Sehwinkel wie in Experiment 3 zu präsentieren müssen diese entsprechend größer gezeigt werden.

5.2. Methodik

Die methodischen Grundlagen zu diesem Experiment wurden bereits im allgemeinen Methodikteil besprochen. In diesem Kapitel werden nur die speziellen Parameter aufgeführt.

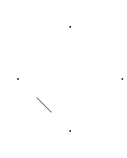


Probanden:

Es wurden insgesamt 27 Probanden im Alter von 18-56 Jahren getestet. 10 Probanden waren männlich und 17 Probanden waren weiblich. Alle Probanden hatten einen normalen Visus, gegebenenfalls durch Korrektur erreicht. Zwei der Probanden waren mit derartigen Experimenten vertraut.

Reizmuster:

Folgende sechs Testfiguren wurden programmiert:

	Figurentyp und Kurzformel	Beschreibung	Beispiel
1.	Ehrenstein- täuschung E_kreis	Länge der induzierenden Linien jeweils 3 Grad Sehwinkel und ihre Stärke 2,4 Winkelminuten. Die zentrale freie Fläche erscheint in einem Durchmesser von zwei Grad Sehwinkel; Position Testlinie: Kreiskontur	
2.	Ehrenstein- täuschung E_raute	wie bei 1.; Position Testlinie: Rautenkontur	
3.	Kontrollfigur1: Vier Punkte 4P_kreis	Eine Sonderform der Ehrensteinfigur, bei der die induzierenden Linien auf eine minimale Länge reduziert wurden, so dass sie wie vier Punkte aussehen. Die zentrale freie Fläche hat die gleiche Größe wie oben; Position Testlinie: Kreiskontur	

4.	Kontrollfigur1: Vier Punkte 4P_raute	wie bei 3.; Position Testlinie: Rautenkontur	
5.	Kontrollfigur2: Keine Linien K_kreis	Keine sichtbare Figur, es ist lediglich die Testlinie und der graue Hintergrund zu sehen Position Testlinie: Kreiskontur	
6.	Kontrollfigur2: Keine Linien K_raute	wie bei 5.; Position Testlinie: Rautenkontur	

Allgemeine Parameter:

Hintergrundsleuchtdichte: 39,8 cd/m²

Leuchtdichte der Inducer: 80,0 cd/m²

Leuchtdichte der ersten Testlinie: 80,0 cd/m²

Position der Testlinie: entlang der Rauten- und Kreiskontur

Länge der Testlinie: 0,466° = 1/3 der maximalen Länge

Stärke der Testlinie:	0,8 Winkelminuten
Darbietungszeit der Testlinie:	200 ms
Darbietung der Testfiguren:	Je 5 Zyklen mit je 30 Figuren = 150 Figuren
Übungsaufgabe:	alle 6 Reizmuster Je 1 Zyklus mit 30 Figuren
Monitor:	Grautöne Auflösung 1024x768 Pixel Abstand 140 cm

5.3. Ergebnis

Von den getesteten 27 Probanden kamen 4 Probanden mit den im Experiment gestellten Aufgaben nicht bzw. nur unzureichend zurecht. Auch bei diesen Probanden bestand ein normaler Visus (gegebenenfalls durch Korrektur erreicht). Einige Probanden hatten Probleme mit der Konzentration, andere konnten die Testlinie vor allem wegen der kurzen Darbietungszeit nicht sicher zuordnen. Eine genauere Bewertung der Schwierigkeiten dieser Probanden folgt im Kapitel 5.4 *Diskussion*. Die Ergebnisse dieser 4 Probanden werden also nicht in das Gesamtergebnis aufgenommen. Für die Auswertung stehen somit die Ergebnisse von 23 Probanden zur Verfügung.

Zunächst wurde entsprechend dem Experiment 2 die Leuchtdichtenschwelle ermittelt. Die Leuchtdichtenschwelle zeigt die Leuchtdichte der Testlinie in cd/m^2 an, bei der die Testlinie vom Probanden mit einer Wahrscheinlichkeit von $62,5\% - f/2$ richtig zugeordnet wird. Diese Wahrscheinlichkeit liegt zwischen der Wahrscheinlichkeit für das sichere Wahrnehmen (100%) und der Trefferwahrscheinlichkeit durch Raten (25%), also bei $[(25\% + 100\%):2] - f/2 = 62,5\% - f/2$.

Diese Leuchtdichtenschwelle wird für jedes der 6 Reizmuster bei jedem Probanden ermittelt. Die Leuchtdichtenschwelle bietet dann die Grundlage für die statistische Auswertung. Im Folgenden wird anhand eines Beispiels die Ermittlung der Leuchtdichtenschwelle erläutert.

Abbildung 15 zeigt die Darstellung der korrekten und falschen Antworten im zeitlichen Verlauf. Als Beispiel wird in dieser Abbildung das Ergebnis des Reizmusters „Ehrensteintäuschung mit Präsentation der Testlinie entlang der Kreiskontur (E_kreis)“

eines Probanden gezeigt. Dabei sind alle 5 Zyklen mit den jeweils 30 einzelnen Testfiguren, also die Ergebnisse für alle 150 Testfiguren aufgeführt.

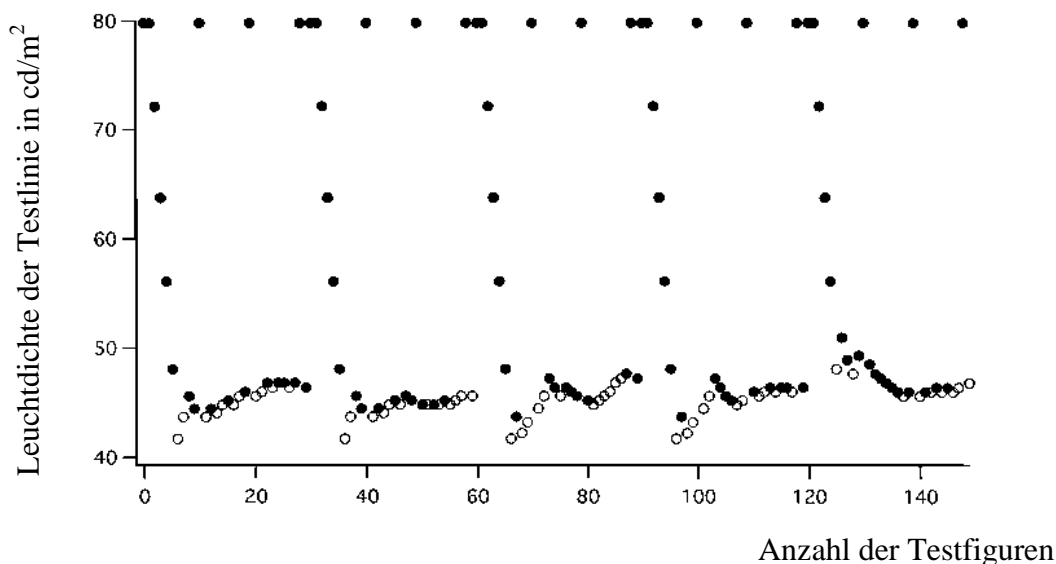


Abbildung 15:

Darstellung der korrekten Antworten für eine Versuchsperson (Proband 1) im zeitlichen Verlauf und in Bezug auf die Leuchtdichte der Testlinie (E_{kreis}); die 5 Zyklen ergeben 150 Testfiguren; die schwarzen Punkte zeigen die korrekten Antworten, die weißen Punkte die falschen Antworten.

Aus Abbildung 15 ist zu erkennen, dass der Versuch mit einer Leuchtdichte der ersten Testlinie von 80 cd/m^2 beginnt. Dies wird vom Probanden richtig in ihrer Position zugeordnet (schwarzer Punkt). Die zweite Figur wird ebenfalls mit einer Testlinie von 80 cd/m^2 richtig beantwortet. Nun werden 5 weitere Figuren mit abnehmender Leuchtdichte der Testlinie gezeigt. Bei diesen ersten 7 Figuren wurde die Leuchtdichte der Testlinien für alle der 6 Reizmuster fest vorherbestimmt, danach wird von einer Best-Pest-Prozedur die nächste Leuchtdichte der Testlinie in Abhängigkeit der korrekten und falschen Antworten ermittelt und zwar unter Berücksichtigung aller in diesem Zyklus gegebenen Antworten. Im konkreten Beispiel beantwortet der Proband die ersten 6 Figuren richtig, die 7. Figur (ca. $41,5 \text{ cd/m}^2$) falsch. Die 8. Figur wird also

mit einer etwas helleren Testlinie präsentiert (ca. 42 cd/m^2). Auch diese Figur wird falsch beantwortet. Die 9. Figur wird also ebenfalls mit einer wiederum helleren Testlinie präsentiert und richtig beantwortet. Die 10. Figur wird nun entsprechend mit einer Testlinie mit geringerer Leuchtdichte präsentiert und so weiter. Nach 10 präsentierten Figuren wird eine Figur mit der Testlinienleuchtdichte 80 cd/m^2 gezeigt, um den Probanden mit einer leicht zu lösenden Aufgabe zu motivieren.

Als nächster Schritt wurde die relative Häufigkeit der korrekten Antworten als Funktion der Leuchtdichte der Testlinie aufgetragen (Abbildung 16).

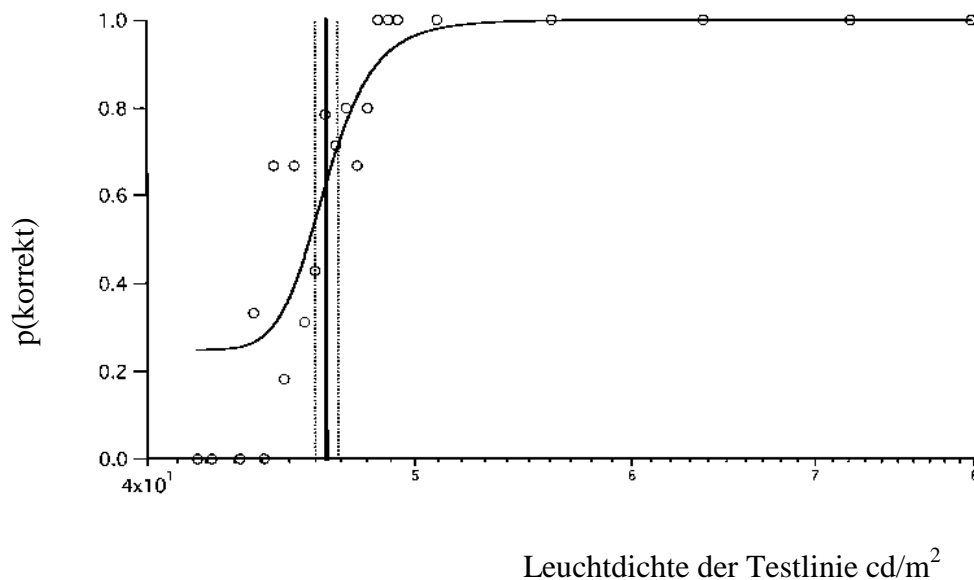


Abbildung 16:

Relative Häufigkeit der korrekten Antworten als Funktion der Leuchtdichte der Testlinie; an diese Daten wurde eine logistische Funktion angepasst, deren Wendepunkt die Schwelle der Leuchtdichte angibt (senkrechte Linie);

Diese Abbildung entspricht dem Datensatz aus Abbildung 15 (Proband 1, E_kreis).

Dies bedeutet im konkreten Beispiel für das in Abbildung 15 und Abbildung 16 gezeigte Experiment für eine Testlinie von 80 cd/m^2 100% richtige Antworten dieses Probanden. Der Proband hat alle Figuren mit Testlinien der Leuchtdichte 80 cd/m^2 richtig beantwortet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich um relative Häufigkeiten handelt. Es ist also aus Abbildung 16 nicht zu erkennen, wie viele einzelne Testfiguren

mit der jeweiligen Leuchtdichte einer Testlinie sich hinter einem Datenpunkt verbergen. Zum Beispiel wurden 25 Figuren mit einer Testlinie der Leuchtdichte 80 cd/m^2 gezeigt, dagegen nur 5 Figuren mit einer Testlinie von ca. 72 cd/m^2 . Beide zeigen in Abbildung 16 einen Wert von 100%. Je näher sich dann die Testlinie der Hintergrundsleuchtdichte annähert, desto weniger richtige Antworten sind festzustellen. Schließlich wird die Ratewahrscheinlichkeit von 25% für Leuchtdichtenwerte nahe der Hintergrundsleuchtdichte erreicht.

Nach dem Auftragen der relativen Häufigkeiten der korrekten Antworten wurde eine logistische Funktion an die Daten angepasst. Dabei berücksichtigt diese Anpassung die oben erwähnte Gewichtung der einzelnen Datenpunkte und bezieht sie in die Kurvenanpassung mit ein. Hat der Proband die helleren Testlinien richtig zugeordnet, sollte die Funktion z.B. bei 80 cd/m^2 den Wert 100% erreichen. Im Bereich der Testlinien mit weniger Kontrast nähert sich die Kurve dem Wert 25%. Der Wendepunkt dieser logistischen Funktion definiert dann die Schwelle der Leuchtdichte. Der Wendepunkt liegt bei $Y=62,5\% - f/2$.

Tabelle 7 zeigt das Ergebnis der Schwelle der Leuchtdichte aller Probanden in Bezug auf die 6 Reizmuster. Diese Daten bilden die Grundlage für die folgende statistische Auswertung.

Figur:	E_kreis	4P_kreis	K_kreis	E_raute	4P_raute	K_raute
Proband 1	46,43	46,31	47,70	46,25	45,35	45,92
2	49,95	51,06	52,48	49,44	48,80	49,80
3	49,56	50,73	50,75	49,67	47,71	49,20
4	52,09	52,07	50,56	50,45	50,08	49,89
5	49,64	48,72	49,17	48,42	48,06	50,41
6	49,67	52,00	53,45	50,39	49,12	50,99
7	55,83	52,85	58,49	51,24	51,36	55,52
8	51,54	51,25	51,82	49,01	49,89	51,08
9	49,03	48,12	49,98	47,89	46,83	48,03
10	55,94	52,45	54,39	53,33	51,69	54,13

11	49,87	49,50	50,93	49,49	49,33	48,37
12	49,02	49,31	50,25	47,18	48,53	47,43
13	53,27	53,83	54,72	51,57	53,35	51,54
14	52,62	52,02	52,11	49,47	50,68	49,87
15	52,95	51,00	50,98	49,32	48,84	49,51
16	46,86	46,38	47,83	45,72	45,61	46,24
17	49,70	49,67	49,40	47,82	47,98	47,90
18	51,92	53,25	55,79	52,15	51,10	54,20
19	46,60	48,36	48,88	47,68	47,70	48,49
20	52,50	50,90	52,20	48,47	48,40	50,91
21	50,03	47,82	48,27	48,18	46,17	47,79
22	59,20	58,98	62,39	58,66	59,03	57,44
23	51,95	51,62	55,57	49,37	51,60	52,05

Tabelle 7:

Das Ergebnis der Schwelle der Leuchtdichte der Testlinie in cd/m^2 .

Aufgeführt sind alle Probanden (1-23) und die 6 Reizmuster.

Über die so gewonnenen Daten kann nun auch unter Einbeziehung der Leuchtdichte des Hintergrunds ($39,84 \text{ cd/m}^2$) die Kontrastschwelle berechnet werden. Für die weitere Datenanalyse wurde der natürliche Logarithmus der Kontrastschwelle verwendet.

natürlicher Logarithmus der Kontrastschwelle = $\ln[(S-H)/(S+H)]$;

wobei S Schwelle der Leuchtdichte der Testlinie [cd/m^2]

H Leuchtdichte des Hintergrunds [cd/m^2];

z.B. für Proband 1, Figurentyp E_kreis (Daten siehe Tabelle 7):

$$\ln[(46,43 \text{ cd/m}^2 - 39,84 \text{ cd/m}^2)/(46,43 \text{ cd/m}^2 + 39,84 \text{ cd/m}^2)] = -2,57 ;$$

Der sich daraus ergebende Datensatz ist in Tabelle 8 aufgeführt.

Figur:	E_kreis	4P_kreis	K_kreis	E_raute	4P_raute	K_raute
Proband 1	-2,57	-2,59	-2,41	-2,60	-2,74	-2,65
2	-2,18	-2,09	-1,99	-2,23	-2,29	-2,20
3	-2,22	-2,12	-2,12	-2,21	-2,41	-2,25
4	-2,02	-2,02	-2,13	-2,14	-2,17	-2,19
5	-2,21	-2,30	-2,26	-2,33	-2,37	-2,14
6	-2,21	-2,02	-1,92	-2,15	-2,26	-2,10
7	-1,79	-1,96	-1,66	-2,08	-2,07	-1,80
8	-2,06	-2,08	-2,03	-2,27	-2,19	-2,09
9	-2,27	-2,36	-2,18	-2,39	-2,52	-2,37
10	-1,78	-1,99	-1,87	-1,93	-2,04	-1,88
11	-2,19	-2,22	-2,10	-2,22	-2,24	-2,34
12	-2,27	-2,24	-2,16	-2,47	-2,32	-2,44
13	-1,94	-1,90	-1,85	-2,05	-1,93	-2,06
14	-1,98	-2,02	-2,01	-2,23	-2,12	-2,19
15	-1,96	-2,10	-2,10	-2,24	-2,29	-2,22
16	-2,51	-2,58	-2,40	-2,68	-2,69	-2,60
17	-2,21	-2,21	-2,23	-2,40	-2,38	-2,39
18	-2,03	-1,94	-1,79	-2,01	-2,09	-1,88
19	-2,55	-2,34	-2,28	-2,41	-2,41	-2,32
20	-1,99	-2,10	-2,01	-2,33	-2,33	-2,10
21	-2,18	-2,40	-2,35	-2,36	-2,61	-2,40
22	-1,63	-1,64	-1,51	-1,66	-1,64	-1,71
23	-2,03	-2,05	-1,80	-2,24	-2,05	-2,02

Tabelle 8:

Der natürliche Logarithmus der Kontrastschwelle aller Probanden und Reizmuster.

Aus dem Datensatz in Tabelle 8 können nun die Parameter für die statistische Auswertung gewonnen werden, wie z.B. Mittelwert, Standardabweichung, Standardfehler des Mittelwertes und Varianz. Diese Parameter werden wiederum auf das jeweilige Reizmuster bezogen.

	E_kreis	4P_kreis	K_kreis	E_raute	4P_raute	K_raute
Mittelwert	-2,120	-2,142	-2,051	-2,244	-2,268	-2,189
Standardabweichung	0,236	0,219	0,231	0,218	0,249	0,238
Standardfehler des Mittelwertes	0,049	0,046	0,048	0,046	0,052	0,050
Varianz	0,056	0,048	0,054	0,048	0,062	0,057
Variationskoeffizient	-0,111	-0,102	-0,113	-0,097	-0,110	-0,109
Minimum	-2,571	-2,588	-2,410	-2,677	-2,737	-2,646
Maximum	-1,632	-1,641	-1,511	-1,655	-1,639	-1,709

Tabelle 9:

Deskriptive statistische Auswertung.

5.3.1 Ergebnis allgemein

	DF	Sum of Squares	Mean Square	f-Value	P-Value	Lambda	Power
Subjekt	22	6,469	0,294				
Scheinkontur	1	0,578	0,579	126,64	<0,0001	126,64	1,000
Scheinkontur * Subjekt	22	0,100	0,005				
Inducer	2	0,179	0,089	12,007	<0,0001	24,013	0,996
Inducer * Subjekt	44	0,327	0,007				
Scheinkontur * Inducer	2	0,001	0,001	0,134	0,8746	0,269	0,069

Tabelle 10:

Anova für $\ln(\text{Kontrastschwelle})$ mit den 2 Faktoren Position der Testlinie (Kreis- oder Rautenkontur) und Inducer (3 Reizmuster).

Reizmuster, Figurentyp	P-Wert	
Ehrensteintäuschung (E), Kontrollfigur 1 (4P)	0,4444	Nicht signifikant
Ehrensteintäuschung (E), Kontrollfigur 2 (K)	0,0051	Signifikant
Kontrollfigur 1 (4P), Kontrollfigur 2 (K)	0,0001	Signifikant

Tabelle 11:

Post-hoc Scheffé-Test für $\ln(\text{Kontrastschwelle})$ in Abhängigkeit des Reizmusters.

Zur Datenanalyse wurde eine Anova mit zwei Faktoren verwendet. Der erste Faktor war die Position der Testlinie, also die Präsentation der Testlinie entlang der Kreis- oder Rautenkontur. Der zweite Faktor waren die Inducer (Ehrensteintäuschung, Kontrollfigur 1, Kontrollfigur 2). Entsprechend den signifikanten Ergebnissen wurde ein Post-hoc Scheffé-Test bestimmt. Dabei zeigte sich folgendes Ergebnis:

Die Ehrensteintäuschung (E_kreis, E_raute) kann die Kontrastschwelle einer Testlinie signifikant im Vergleich zur Kontrollfigur 2 (keine Linien, K_kreis, K_raute) senken ($p=0,0051$).

Die Kontrollfigur 1 (vier Punkte, 4P_kreis, 4P_raute) kann ebenfalls die Kontrastschwelle einer Testlinie signifikant im Vergleich zur Kontrollfigur 2 (K_kreis, K_raute) senken ($p=0,0001$).

Zwischen der Ehrensteintäuschung (E_kreis, E_raute) und der Kontrollfigur 1 (4P_kreis, 4P_raute) besteht dabei kein signifikanter Unterschied ($p=0,4444$).

Dabei gibt es keine Interaktion der einzelnen Komponenten (Tabelle 11).

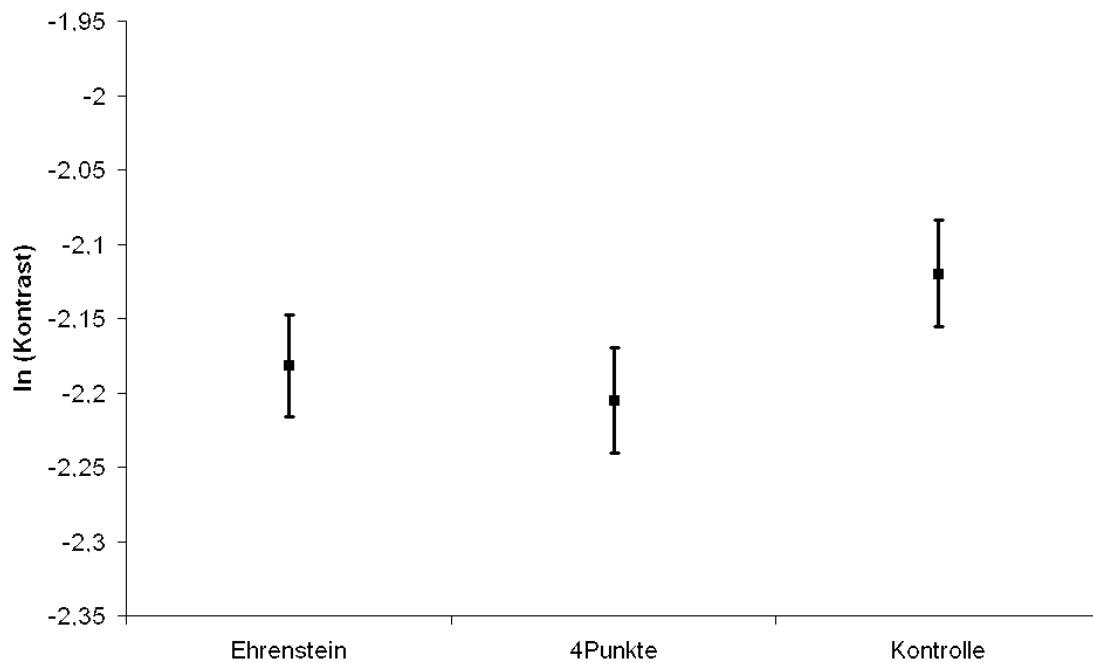


Abbildung 17:

Mittelwerte und Standardfehler des Mittelwertes des natürlichen Logarithmus der ermittelten Kontrastschwelle aller Probanden (n=23) in Abhängigkeit vom Reizmuster. Die Ehrensteintäuschung und die Kontrollfigur 1 erreichen eine signifikante Reduktion der Kontrastschwelle gegenüber der Kontrollfigur 2.

Abbildung 17 verdeutlicht noch einmal graphisch das Ergebnis der Kontrastschwelle der verschiedenen Reizmuster. Die Ehrensteintäuschung und die Kontrollfigur 1 können signifikant eine Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie erzeugen im Vergleich zur Kontrollfigur 2. Zwischen der Ehrensteintäuschung und der Kontrollfigur 1 besteht dabei kein signifikanter Unterschied.

5.3.2 Ergebnis Vergleich Kreis und Raute

Reizmuster, Position der Testlinie	P-Wert	
Kreis, Raute	<0,0001	Signifikant

Tabelle 12:

Scheffé für $\ln(\text{Kontrastschwelle})$ in Abhängigkeit von der Lage der Testlinie (entlang der Kreis- und Rautenkontur).

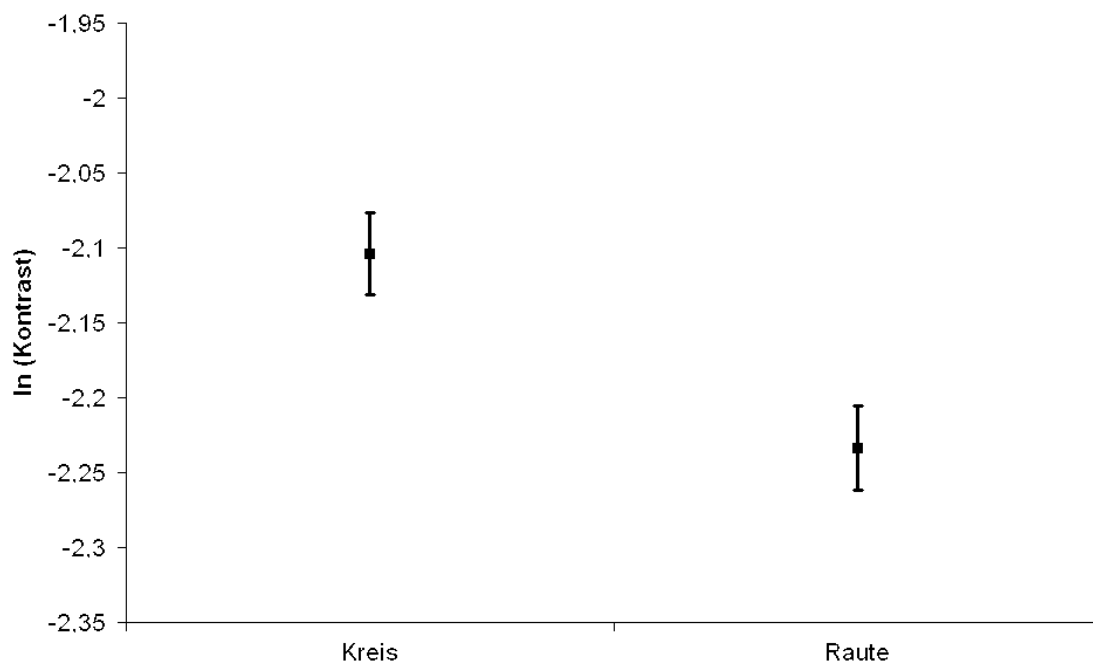


Abbildung 18:

Mittelwerte und Standardfehler des Mittelwertes des natürlichen Logarithmus der ermittelten Kontrastschwelle aller Probanden ($n=23$) in Abhängigkeit von der Lage der Testlinie (entlang der Kreis- und Rautenkontur). Für die Präsentation der Testlinie entlang der Rautenkontur werden signifikant niedrigere Kontrastschwellen erreicht als bei der Präsentation entlang der Kreiskontur.

Die Reizmuster mit einer Testlinie entlang der Rautenkontur (E_raute, 4P_raute, K_raute) zeigen eine signifikante Reduktion ($p < 0,0001$, siehe Tabelle 12) der Kontrastschwelle im Vergleich zu den Reizmustern mit einer Testlinie entlang der Kreiskontur (E_kreis, 4P_kreis, K_kreis).

Abbildung 18 verdeutlicht den Vergleich der erreichten Kontrastschwellen für die Präsentation der Testlinie entlang der Kreiskontur und der Rautenkontur. Für die Präsentation der Testlinie entlang der Rautenkontur werden dabei signifikant niedrigere Kontrastschwellen erreicht.

5.4. Diskussion

Im Hauptexperiment bestätigen sich die Thesen, die sich im Experiment 3 bereits andeuteten. Die Ehrensteintäuschung kann die Kontrastschwelle einer Testlinie signifikant reduzieren im Vergleich zur Kontrolle ohne Linien (Kontrollfigur 2). In diesem Experiment wurde die Testlinie in 1/3 ihrer maximalen Länge entlang der rautenförmigen und der kreisförmigen Scheinkontur präsentiert.

Entsprechend dem Experiment 3 kann die Kontrollfigur 1 (vier Punkte, 4P) ebenfalls die Kontrastschwelle der Testlinie signifikant reduzieren im Vergleich zur Kontrollfigur 2.

Es ergibt sich dabei wie im Experiment 3 kein signifikanter Unterschied zwischen der Ehrensteintäuschung und der Kontrollfigur 1. Es ist daher naheliegend, dass der Mechanismus, der die Reduktion der Kontrastschwelle erzeugt, bei beiden Figuren der gleiche ist. Die Kontrollfigur 1 erzeugt keine Scheinkontur und keine Scheinoberfläche. Deshalb muss nach einem Effekt gesucht werden, der die Lokalisation der Testlinie signifikant erleichtert, ohne dass dazu eine Scheinkontur notwendig ist. Bereits im Experiment 3 drängte sich die These auf, dass durch die Ehrensteintäuschung und die Kontrollfigur 1 die räumliche Lokalisation der Testlinie derartig erleichtert wird im Vergleich zu Kontrollfigur 2, dass dadurch eine signifikant geringere Kontrastschwelle entsteht. Dies ist anscheinend auch bei reduzierter Testlinienlänge und entlang einer Kreiskontur möglich.

Von den getesteten 27 Probanden kamen wie bereits oben erwähnt 4 Probanden mit den im Experiment gestellten Aufgaben nicht bzw. nur unzureichend zurecht, obwohl auch bei diesen Probanden ein normaler Visus bestand und die Probanden die Aufgabenstellung und die Übungsaufgaben verstanden hatten. Diese Ursachen sind sicher vielschichtig. Zwei Probanden kamen überhaupt nicht mit den Aufgaben zurecht. Sie gaben an, dass sie ihre Aufmerksamkeit nicht ausreichend in der sehr kurzen Zeit der Präsentation der Testlinie konzentrieren könnten. Diese Probanden konnten selbst die hellste Testlinie mit 80 cd/m^2 nicht immer wahrnehmen, so dass bei der Kurvenanpassung eine sehr flache logistische Funktion gewählt werden müsste, die dann einen sehr ungenauen Bereich der Kontrastschwelle liefern würde. Die Ergebnisse dieser Probanden konnten deshalb nicht verwendet werden. Die anderen zwei Probanden wurden offensichtlich durch das Austesten der Wahrnehmungsgrenze unaufmerksam. Zwar waren sie sehr wohl in der Lage, die helleren Testlinien zuzuordnen, allerdings beendeten diese Probanden nach wenigen Testfiguren ihre Konzentration, als die Leuchtdichte der Testlinie reduziert wurde. Sie befanden sich nach eigenen Angaben in einer unaufmerksamen Phase, in der die Position der Testlinie nur geraten werden konnte. Dabei erreicht methodisch bedingt jeder Proband mehrmals den Bereich, in dem eine Antworttaste durch Raten gedrückt werden muss, allerdings hatten diese Probanden jede Konzentration verloren und bemerkten auch nicht die Position der anschließend gezeigten helleren Testlinien. Dadurch ergeben sich Trefferraten ohne sinnvollen Zusammenhang, diese Daten konnten nicht verwendet werden. Die Reizmuster wurden aufgrund der Erfahrungen aus dem Experiment 3 bewusst schwieriger gestaltet. Es zeigt sich aber hier die große Schwierigkeit, die Reizmuster so zu gestalten, dass alle Probanden gut getestet werden können, ohne dabei einzelne zu überfordern oder während des Experiments zu frustrieren.

6. Allgemeine Diskussion

In dieser Arbeit wurde untersucht, ob und wenn ja inwiefern die Wahrnehmung im Bereich einer Scheinkontur der Ehrensteintäuschung verändert werden kann. Grundlage dieser These bildete ein Experiment von Dresch und Bonnet.^I In diesem Experiment wurden Testlinien entlang einer Scheinkontur des Kanisza-Quadrats präsentiert. Das Kanisza-Quadrat erzeugt eine Scheinkontur und eine Scheinoberfläche durch induzierende geometrische Formen. Die Kontrastschwelle dieser Testlinie konnte im Vergleich zu einer Kontrollfigur signifikant reduziert werden. Diese Kontrollfigur erzeugt keine Scheinkontur. Dresch und Bonnet folgerten daraus, dass die Reduktion der Kontrastschwelle der Testlinie durch den Einfluss der Scheinkontur zustande kommen muss. Basierend auf Experimenten von Gove, Grossberg und Mingolla^{II, III, IV}, geht man derzeit davon aus, dass eine reale Linie und eine Scheinkontur, das heißt eine „Linie“ ohne physikalisches Gegenstück, in Bezug auf die Wahrnehmung gleiche Eigenschaften besitzen und somit im folgenden neuronalen Prozess eine gleiche Informationsverarbeitung erfolgt. In diesem Zusammenhang ist auch die Verwendung einer Testlinie begründet. Die Testlinie bildet eine methodische Möglichkeit, die Wahrnehmung einer Scheinkontur an einer bestimmten Position zu untersuchen, eben mit dem genannten Hintergrund, dass diese Testlinie und die Scheinkontur vom Sehsystem in gleicher Weise verarbeitet werden. Im oben geschilderten Experiment von Dresch und Bonnet wurde eine Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie nachgewiesen, die entlang der Scheinkontur des Kanisza-Quadrats präsentiert wurde. Die Reduktion der Kontrastschwelle wurde durch *Unterschwelligkeitsaddition* erklärt. Dies bedeutet, dass zwei Kontrastreize, die isoliert betrachtet nicht wahrnehmbar sind,

^I Dresch B, Bonnet C. Subthreshold summation with illusory contours. *Vision Res* 1995; 35(8):1071-1078.

^{II} Gove A, Grossberg S, Mingolla E. Brightness perception, illusory contours, and corticogeniculate feedback. *Vis Neurosci* 1995; 12(6):1027-1052.

^{III} Grossberg S, Mingolla E. Neural dynamics of perceptual grouping: textures, boundaries, and emergent segmentations. *Percept Psychophys* 1985; 38(2):141-171.

^{IV} Grossberg S, Mingolla E. Neural dynamics of form perception: boundary completion, illusory figures, and neon color spreading. *Psychol Rev* 1985; 92(2):173-211.

also unter der Kontrastschwelle liegen, in ihrer Überlagerung (Summation) einen überschwelligen Kontrastreiz ergeben und somit eine Wahrnehmung erfolgt.

In dieser Arbeit wurde nun analog die Ehrensteintäuschung untersucht. Zunächst gilt zu unterscheiden, dass die Ehrensteintäuschung eine Scheinkontur und eine Scheinoberfläche generiert, induziert von vier Linien. Die Form dieser Scheinkontur ist bei vier Linien nicht eindeutig. Bei Hinzufügen von weiteren induzierenden Linien kann die erzeugte Form spezifiziert werden, z.B. als Kreis oder Quadrat etc. In der Grundform (vier induzierende Linien) ist keine eindeutige Bestimmung der Form möglich. Deshalb wurde zunächst in einem einfachen Experiment (Experiment 1) die Häufigkeit der wahrgenommenen Formen untersucht. Dabei zeigte sich, dass Kreis und Raute von den getesteten Versuchspersonen am häufigsten wahrgenommen wurden.

Anhand dieser Erkenntnis aus dem Experiment 1 wurden in den Experimenten 3 und 4 Testlinien entlang der Scheinkontur der Ehrensteintäuschung präsentiert. Die Position der Testlinien war entsprechend entlang der Kreis- oder Rautenkontur.

In diesen Experimenten konnte, wie in den Experimenten von Dresch und Bonnet beim Kanisza-Quadrat, eine signifikante Reduktion der Kontrastschwelle der Testlinie erzeugt werden, die entlang der Scheinkontur der Ehrensteintäuschung präsentiert wurde. Diese Reduktion der Kontrastschwelle wurde sowohl für die Kreis- als auch für die Rautenkontur nachgewiesen.

In den gezeigten Experimenten wurden zwei Kontrollfiguren mit der Ehrensteintäuschung verglichen und ebenfalls zusammen mit Testlinien präsentiert. Dabei zeigte sich zunächst, dass die Reduktion der Kontrastschwelle bei der Ehrensteintäuschung gegenüber einer Kontrollfigur ohne Linien oder anderen Elementen, also ohne Inducer (entspricht der Präsentation einer Testlinie ohne Figur, *Kontrollfigur 2*) signifikant nachweisbar ist. Eine weitere Kontrollfigur (*Kontrollfigur 1*), die keine Scheinkontur erzeugt, jedoch durch ihre Beschaffenheit die räumliche Orientierung und somit die Lokalisation der Testlinie erleichtert, konnte ebenfalls die Kontrastschwelle der Testlinie signifikant reduzieren. Diese *Kontrollfigur 1* stellte eine Sonderform der Ehrensteintäuschung dar, bei der die induzierenden Linien jeweils bis auf einen Punkt reduziert wurden und somit diese Figur weder eine Scheinkontur noch eine Scheinoberfläche erzeugen kann. Diese *Kontrollfigur 1* zeigte keinen signifikanten Unterschied in der Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie

gegenüber der Ehrensteintäuschung. Diese Tatsache war unabhängig von den berücksichtigten Parametern wie Präsentationszeit, Länge der Testlinie, Kontrastpolarität und Präsentation entlang der Rauten- oder Kreiskontur.

Aufgrund dieser Ergebnisse muss gefolgert werden, dass die *Kontrollfigur 1* und die Ehrensteintäuschung gleiche Eigenschaften besitzen, die zur Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie führen. Da die *Kontrollfigur 1* aber keine Scheinkontur erzeugen kann, muss das beobachtete Phänomen ebenfalls unabhängig von der Scheinkontur betrachtet werden. Damit kann nicht von einer Summation unterschwelliger Kontrastsignale entlang Scheinkonturen der Ehrensteintäuschung gesprochen werden. Dieses Ergebnis dieser Arbeit steht im Widerspruch zu den Experimenten am Kanisza-Quadrat von Dresp und Bonnet.

Die Bewertung dieser konträren Aussagen ergibt folgende Kernfrage:

Handelt es sich bei der Entstehung der Scheinkonturen und Scheinoberflächen durch die Ehrensteintäuschung und durch das Kanisza-Quadrat um zwei unterschiedliche Mechanismen?

Die Scheinkontur der Ehrensteintäuschung wird durch die induzierenden Linien generiert. Die Scheinkontur des Kanisza-Quadrats wird durch die geometrischen Flächen erzeugt. Theoretisch sind sowohl zwei unterschiedliche Mechanismen sowie aber auch ein Mechanismus mit zwei „Extremformen“ denkbar. Zumindest wäre im Fall der unterschiedlichen Mechanismen eine mögliche Erklärung für die verschiedenen Ergebnisse gegeben. Dabei gilt aber festzuhalten, dass die beiden Täuschungsfiguren einige gemeinsame Eigenschaften in Bezug auf die Entstehung der Scheinkontur besitzen. So konnte beispielsweise für beide Täuschungsfiguren nachgewiesen werden, dass unterschiedliche Kontrastpolaritäten der Inducer keinen Effekt auf die Erzeugung der Scheinkontur aufweisen.^{I, II} Ebenfalls gleich reagieren beide Scheinkonturen dieser Täuschungsfiguren auf die Veränderung der räumlichen Faktoren der Inducer, also die Abhängigkeit der Qualität der Scheinkontur von z.B. der Stärke der Linien bzw.

^I Prazdny K. Illusory contours are not caused by simultaneous brightness contrast. *Percept Psychophys* 1983; 34(4):403-404.

^{II} Hershberger W, Stallard S. Contrast variability lightens subjective figures. *Percept Psychophys* 1984; 36(1):92-94.

Flächen oder dem Kontrast der Inducer.^I ^{II} Schließlich zeigen sich auch Übereinstimmungen in Bezug auf den untersuchten neuronalen Verarbeitungsprozess.^{III}

^{IV} Diese Gemeinsamkeiten sprechen gegen zwei unterschiedliche Mechanismen.

Sicherlich muss auch die Korrektheit der beiden Ergebnisse kritisch betrachtet werden. Im Experiment von Dresch und Bonnet wurden nur zwei Versuchspersonen getestet, wobei ein Proband die Autorin Brigitta Dresch war. Leider werden in der Veröffentlichung des Experiments keine mathematischen Daten demonstriert, aber auch ohne erneute Prüfung der Daten muss ein Ergebnis, das anhand von zwei Versuchspersonen gewonnen wurde, in seiner Aussage relativiert werden. Von den Autoren wird in dieser Veröffentlichung nicht genauer erläutert, warum das Experiment mit nur zwei Probanden durchgeführt wurde und inwieweit dabei eine mathematisch signifikante Aussage möglich ist.

Im Hauptexperiment (Experiment 4) dieser Arbeit kamen einige der Probanden mit der gestellten Aufgabe nicht zurecht. Dies muss in der Bewertung des Gesamtergebnisses mit einbezogen werden. Die meisten dieser Probanden hatten Probleme sich während der gesamten Versuchzeit zu konzentrieren, sie bezeichneten die Aufgaben als „zu schwer“.

Es werden weitere Experimente notwendig sein, um einen möglichen Unterschied der Erzeugung der Scheinkontur bei der Ehrensteintäuschung und dem Kanisza-Quadrat zu erforschen. Sehr interessant wäre dabei die Wiederholung des Experiments von Dresch und Bonnet mit einer größeren Anzahl an Probanden. Des Weiteren wäre denkbar, andere Kontrollfiguren zu testen, die ebenfalls keine Scheinkontur erzeugen, jedoch auch die räumliche Erleichterung der Lokalisation der Testlinie ermöglichen, um näher zu ergründen, wodurch die Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie in diesem

^I Salvano-Pardieu V. Spatial factors of brightness illusion in the Ehrenstein figure. *Perception* 2000; 29(6):709-720.

^{II} Lesher GW, Mingolla E. The role of edges and line-ends in illusory contour formation. *Vision Res* 1993; 33(16):2253-2270.

^{III} Peterhans E, von der Heide R. Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. II. Contours bridging gaps. *J Neurosci* 1989; 9(5):1749-1763.

^{IV} von der Heide R, Peterhans E, Baumgartner G. Illusory contours and cortical neuron responses. *Science* 1984; 224(4654):1260-1262.

Experiment begründet ist. Weitere Täuschungsfiguren zu untersuchen würde dann diese Ergebnisse abrunden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie entlang Scheinkonturen der Ehrensteintäuschung durch Unterschwellensummutation im verwendeten Versuchsaufbau ausgeschlossen werden kann. Eine Summation unterschwelliger Kontrastsignale durch eine Scheinkontur der Ehrensteintäuschung kann somit nicht nachgewiesen werden. Die Existenz der Unterschwellensummutation durch Scheinkonturen generell muss kritisch in Frage gestellt werden.

7. Zusammenfassung

Die Wahrnehmung von Scheinkonturen zeigt einen faszinierenden Anteil des Sehprozesses in isolierter Form. In dieser Arbeit wurden Experimente anhand der Ehrensteintäuschung gezeigt. Die Ehrensteintäuschung erzeugt eine Scheinkontur meist in der Form des Kreises, der Raute und des Quadrats. Die zentrale Frage dieser Arbeit war, zu ergründen, inwieweit eine Veränderung der Wahrnehmung einer Testlinie erfolgt, die entlang einer Scheinkontur der Ehrensteintäuschung präsentiert wird. In einer Arbeit ¹ anhand des Kanisza-Quadrats gab es Hinweise, dass die Wahrnehmung einer Testlinie, die entlang einer Scheinkontur des Kanisza-Quadrats präsentiert wird, erleichtert wird. Die Testlinie erreichte eine signifikant niedrigere Kontrastschwelle.

In den hier gezeigten Experimenten konnte eine Unterschwellensumation für die Ehrensteintäuschung nicht bestätigt werden. Die Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie konnte zwar erzeugt werden, jedoch zeigte eine entsprechend gewählte Kontrollfigur eine ebenbürtige Reduktion der Kontrastschwelle. Da diese Kontrollfigur aber keine Scheinkontur generiert, muss das beobachtete Phänomen ebenfalls unabhängig von der Scheinkontur gesehen werden. Eine naheliegende Erklärung wäre, dass durch diese Figuren eine Lokalisation der Testlinie erleichtert wird und dies zu einer Reduktion der Kontrastschwelle einer Testlinie führt.

Die Summation unterschwelliger Kontrastsignale entlang Scheinkonturen der Ehrensteintäuschung kann damit nicht nachgewiesen werden.

Weitere Experimente werden erforderlich sein, um den Sehprozess im Zusammenhang mit der Entstehung einer Scheinkontur und einer Scheinoberfläche besser zu verstehen. Zunächst müssen die Ergebnisse am Kanisza-Quadrat überprüft werden, um zu bestätigen, dass beim Kanisza-Quadrat und damit generell eine Unterschwellensumation bei einer Scheinkontur möglich ist. Danach muss weiter erforscht werden, inwieweit diesen beiden Täuschungsfiguren ein gleicher Mechanismus in der Entstehung der Scheinkonturen zugrunde liegt, oder ob zwei isoliert zu betrachtende Mechanismen zugrunde liegen.

¹ Dresch B, Bonnet C. Subthreshold summation with illusory contours. Vision Res 1995; 35(8):1071-1078.

8. Literaturverzeichnis

- (1) Avery GC, Day RH. Basis of the horizontal-vertical illusion. *J Exp Psychol* 1969; 81(2):376-380.
- (2) Bach M, Meigen T, Strasburger H. Raster-scan cathode ray tubes for vision research -- limits of resolution in space, time and intensity, and some solutions. *Spatial Vision* 1997, 10: 403-414.
- (3) Bravo M, Blake R, Morrison S. Cats see subjective contours. *Vision Res* 1988; 28:861-865.
- (4) Day RH. The basis of perceptual constancy and perceptual illusion. *Invest Ophthalmol* 1972; 11(6):525-532.
- (5) Day RH. Visual spatial illusions: a general explanation. *Science* 1972; 175(28):1335-1340.
- (6) Day RH, Kasperczyk RT. Amodal completion as a basis for illusory contours. *Percept Psychophys* 1983; 33(4):355-364.
- (7) Dresp B, Lorenceau J, Bonnet C. Apparent brightness enhancement in the Kanizsa square with and without illusory contour formation. *Perception* 1990; 19(4):483-489.
- (8) Dresp B, Bonnet C. Psychophysical evidence for low-level processing of illusory contours and surfaces in the Kanizsa square. *Vision Res* 1991; 31(10):1813-1817.
- (9) Dresp B. Local brightness mechanisms sketch out surfaces but do not fill them in: psychophysical evidence in the Kanizsa square. *Percept Psychophys* 1992; 52(5):562-570.
- (10) Dresp B, Bonnet C. Psychophysical measures of illusory form perception: further evidence for local mechanisms. *Vision Res* 1993; 33(5-6):759-766.

-
- (11) Dresp B. Bright lines and edges facilitate the detection of small light targets. *Spat Vis* 1993; 7(3):213-225.
 - (12) Dresp B, Bonnet C. Subthreshold summation with illusory contours. *Vision Res* 1995; 35(8):1071-1078.
 - (13) Dresp B, Salvano-Pardieu V, Bonnet C. Illusory form with inducers of opposite contrast polarity: evidence for multistage integration. *Percept Psychophys* 1996; 58(1):111-124.
 - (14) Dresp B, Grossberg S. Contour integration across polarities and spatial gaps: from local contrast filtering to global grouping. *Vision Res* 1997; 37(7):913-924.
 - (15) Dresp B. The effect of practice on the visual detection of near-threshold lines. *Spat Vis* 1998; 11(3):315-327.
 - (16) Dresp B. Dynamic characteristics of spatial mechanisms coding contour structures. *Spat Vis* 1999; 12(2):129-142.
 - (17) Dresp B, Grossberg S. Spatial facilitation by color and luminance edges: boundary, surface, and attentional factors. *Vision Res* 1999; 39(20):3431-3443.
 - (18) Dresp B. Do alignment thresholds define a critical boundary in long-range detection facilitation with co-linear lines? *Spat Vis* 2000; 13(4):343-357.
 - (19) Ehrenstein W. Über die Abwandlung der L. Hermannschen Helligkeitserscheinung. *Zeitschrift für Psychologie* 2004; 150:83-91.
 - (20) Ejima Y, Redies C, Takahashi S, Akita M. The neon color effect in the Ehrenstein pattern. Dependence on wavelength and illuminance. *Vision Res* 1984; 24(12):1719-1726.
 - (21) Fechner GT. *Elemente der Psychophysik*. Breitkopf & Härtel 1860.
 - (22) Fraser AS. Ehrenstein variations. *Perception* 1983; 12(2):143-147.

- (23) Gove A, Grossberg S, Mingolla E. Brightness perception, illusory contours, and corticogeniculate feedback. *Vis Neurosci* 1995; 12(6):1027-1052.
- (24) Grossberg S, Mingolla E. Neural dynamics of perceptual grouping: textures, boundaries, and emergent segmentations. *Percept Psychophys* 1985; 38(2):141-171.
- (25) Grossberg S, Mingolla E. Neural dynamics of form perception: boundary completion, illusory figures, and neon color spreading. *Psychol Rev* 1985; 92(2):173-211.
- (26) Hamada J. Overall brightness decrease observed in the Ehrenstein illusion induced for both contrast polarities. *Percept Psychophys* 1987; 41(1):67-72.
- (27) Harvey L. Efficient estimation of sensory thresholds. *Behavior Research Methods, Instruments, Computers* 1986; 18:623-632.
- (28) Heitger F, Rosenthaler L, von der Heidt R, Peterhans E, Kubler O. Simulation of neural contour mechanisms: from simple to end-stopped cells. *Vision Res* 1992; 32(5):963-981.
- (29) Hershberger W, Stallard S. Contrast variability lightens subjective figures. *Percept Psychophys* 1984; 36(1):92-94.
- (30) Jory MK, Day RH. The relationship between brightness contrast and illusory contours. *Perception* 1979; 8(1):3-9.
- (31) King-Smith PE, Kulikowski JJ. Pattern and flicker detection analysed by subthreshold summation. *J Physiol* 1975; 249(3):519-548.
- (32) Kulikowski JJ, King-Smith PE. Spatial arrangement of line, edge and grating detectors revealed by subthreshold summation. *Vision Res* 1973; 13(8):1455-1478.
- (33) Lee TS, Nguyen M. Dynamics of subjective contour formation in the early visual cortex. *Proc Natl Acad Sci* 2001; 98:1907-1911.

-
- (34) Leshner GW, Mingolla E. The role of edges and line-ends in illusory contour formation. *Vision Res* 1993; 33(16):2253-2270.
- (35) Levine DS, Grossberg S. Visual illusions in neural networks: line neutralization, tilt after effect, and angle expansion. *J Theor Biol* 1976; 61(2):477-504.
- (36) Lieberman HR, Pentland AP. Microcomputer-based estimation of psychophysical thresholds: The best PEST. *Behavior Research Methods, Instruments, Computers* 1982; 14:21-25.
- (37) McCourt ME, Paulson K. The influence of illusory contours on the detection of luminance increments and decrements. *Vision Res* 1994; 34(18):2469-2475.
- (38) Michotte A, Thines G, Crabbe G. Les complements amodaux de structures perceptives. *Studia Psychologica Publications Universitaires de Louvain* 1964.
- (39) Morgan MJ, Dresch B. Contrast detection facilitation by spatially separated targets and inducers. *Vision Res* 1995; 35(8):1019-1024.
- (40) Nieder A, Wagner H. Perception and neural coding of subjective contours in the owl. *Nature Neuroscience* 1999; 2:660-663.
- (41) Peterhans E, von der Heide R. Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. II. Contours bridging gaps. *J Neurosci* 1989; 9(5):1749-1763.
- (42) Peterhans E, Heitger F. Simulation of neuronal responses defining depth order and contrast polarity at illusory contours in monkey area V2. *J Comput Neurosci* 2001; 10(2):195-211.
- (43) Petry S, Harbeck A, Conway J, Levey J. Stimulus determinants of brightness and distinctness of subjective contours. *Percept Psychophys* 1983; 34(2):169-174.
- (44) Prazdny K. Illusory contours are not caused by simultaneous brightness contrast. *Percept Psychophys* 1983; 34(4):403-404.

-
- (45) Prazdny K. On the nature of inducing forms generating perceptions of illusory contours. *Percept Psychophys* 1985; 37(3):237-242.
 - (46) Prazdny K. Illusory contours from inducers defined solely by spatiotemporal correlation. *Percept Psychophys* 1986; 39(3):175-178.
 - (47) Redies C, Spillman L. The neon color effect in the Ehrenstein illusion. *Perception* 1982; 10(6):667-681.
 - (48) Rock I, Anson R. Illusory contours as the solution to a problem. *Perception* 1979; 8:665-681.
 - (49) Salvano-Pardieu V. Spatial factors of brightness illusion in the Ehrenstein figure. *Perception* 2000; 29(6):709-720.
 - (50) Sinai MJ, Essock EA, McCarley JS. Spatial sensitization of increments and decrements: a border-contrast process and a net-excitation process. *Vision Res* 1999; 39(10):1847-1860.
 - (51) Smith A, Over R. Tilt aftereffects with subjective contours. *Nature* 1975; 257:581-582.
 - (52) Spillmann L, Fuld K, Gerrits HJ. Brightness contrast in the Ehrenstein illusion. *Vision Res* 1976; 16(7):713-719.
 - (53) Spillmann L, Redies C. Random-dot motion displaces Ehrenstein illusion. *Perception* 1981; 10(4):411-415.
 - (54) Spillmann L, Fuld K, Neumeier C. Brightness matching, brightness cancellation, and increment threshold in the Ehrenstein illusion. *Perception* 1984; 13(5):513-520.
 - (55) Spillmann L, Dresch B. Phenomena of illusory form: can we bridge the gap between levels of explanation? *Perception* 1995; 24(11):1333-1364.
 - (56) van Hateren JH, Srinivasan MV, Wait PB. Pattern recognition in bees: orientation discrimination. *J Comp Physiol A* 1990; 167:649-654.

- (57) von der Heide R, Peterhans E, Baumgartner G. Illusory contours and cortical neuron responses. *Science* 1984; 224(4654):1260-1262.
- (58) von der Heide R, Peterhans E. Mechanisms of contour perception in monkey visual cortex. I. Lines of pattern discontinuity. *J Neurosci* 1989; 9(5):1731-1748.
- (59) Watanabe T, Nanez JE, Sr., Moreno MA. Depth release of illusory contour shape in the Ehrenstein grid. *Vision Res* 1995; 35(20):2845-2851.
- (60) Wehrhahn C, Dresch B. Detection facilitation by collinear stimuli in humans: dependence on strength and sign of contrast. *Vision Res* 1998; 38(3):423-428.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Bernd <u>Guido</u> Brosinger
Geburtsdatum	19. Juni 1973
Geburtsort	Ingolstadt
Konfession	römisch-katholisch
Familienstand	verheiratet, Vater einer Tochter

Schulausbildung

08/1979-07/1983	Grundschule Haunwöhr
08/1983-07/1984	Hauptschule an der Maximilianstraße
08/1984-07/1993	Apian-Gymnasium Ingolstadt, Abschluss Abitur

Hochschulausbildung

10/1993-09/1994	Studium der Musikwissenschaften an der Kath. Universität Eichstätt
10/1994-05/2001	Studium der Medizin an der Universität Würzburg

Berufliche Tätigkeit

01/2002-06/2003	Arzt im Praktikum in der Chirurgischen Klinik am Klinikum Ingolstadt
seit 07/2003	Assistenzarzt in der Chirurgischen Klinik am Klinikum Ingolstadt

Guido Brosinger