
WAHRNEHMUNGSDEFIZITE BEI
ZENTRALEN NEUROLOGISCHEN ERKRANKUNGEN -
FARBWAHRNEHMUNG AUF RETINALER UND
ZEREBRALER EBENE

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)
an der



Justus-Liebig-Universität Giessen
Fachbereich 06: Psychologie und
Sportwissenschaft
Abteilung Allgemeine Psychologie
Otto-Behagel-Strasse 10F
D-35394 Giessen

eingereicht im Dezember 2006
von
Lars Pracejus
geboren am 06. September 1975
in Wolfsburg

Dekan

Prof. Dr. Joachim C. Brunstein (Pädagogische Psychologie, Giessen)

1. Gutachter

Prof. Dr. Karl R. Gegenfurtner (Allgemeine Psychologie, Giessen)

2. Gutachter

Prof. Dr. Hans Irtel (Allgemeine Psychologie, Mannheim)

Mitglied der Prüfungskommission

Prof. Dr. Frank Bremmer (Neurophysik, Marburg)

*Für Patricia,
die mir stets zur Seite stand,
mich ermutigte und bestärkte.*

*Für meine Eltern,
die immer an mich geglaubt haben.*

DANKSAGUNG

Mein Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung in Forschung und Reisen.

Ich danke dem Graduierten-Kolleg „Neuronale Repräsentation und Handlungssteuerung - NeuroAct" (DFG 885) für Aus- und Weiterbildung sowie die dreijährige Begleitung.

Ich danke meinem Doktorvater Prof. Dr. Karl R. Gegenfurtner für seine Betreuung.

Mein Dank gilt der neurologischen Klinik in Braunfels, speziell der ärztlichen Direktion: Herrn Dr. Böhm und Frau Dr. Sünkeler, allen Psychologinnen und Psychologen der Abteilung Neuropsychologie und ganz speziell Herrn Dipl.-Päd. Michael Habermehl für seine geduldige Arbeit in der Therapieplanung und die schnelle Kommunikation.

Ich danke meinem "Creative Consultant" Prof. Dr. Charles A. Heywood, Dr. Robert W. Kentridge und Dr. Goeff Cole von der University of Durham, UK, die mir Forschungsaufenthalte ermöglichten und meinen Horizont erweiterten.

Ich danke für technische Unterstützung in Programmierung und Versuchsaufbau: Dipl.-Inf. Jan Drewes, Dipl.-Inf. Lukas Kaim, Dr. Thorsten Hansen und besonders Herrn Walter Kirchner für zahllose Kleinigkeiten.

Ich danke allen Arbeitskolleginnen und -kollegen der Abteilung Allgemeine Psychologie an der Justus-Liebig-Universität Giessen, insbesondere Frau Dipl.-Psych. Jutta Billino, für fachlich bereichernde Dispute, methodische Anregungen und erbauliche Gespräche.

Ebenfalls danke ich Frau cand. Psych. Franziska Seidl, Frau cand. Psych. Melanie von der Lahr und Frau cand. Psych. Klio Hilber für Unterstützung bei der Datenerhebung.

Mein Dank gilt dem Bender Institute of Neuroimaging (B.I.O.N.) in Giessen für die freundliche Erlaubnis, technisches Gerät zur Kopie der Bildgebung mitbenutzen zu dürfen.

Großer Dank gilt auch den Mitarbeitern der Werkstatt im Fachbereich 06, Psychologie, für schnelle und präzise Umsetzung meiner Zeichnungen, Pläne und Ideen.

Nicht zuletzt gilt mein größter Dank allen neurologischen Patientinnen und Patienten in Braunfels und Durham, die durch ihre freiwillige Teilnahme dieses Forschungsprojekt erst möglich gemacht haben. Ich wünsche ihnen alles Gute und viel Gesundheit.

 Inhaltsverzeichnis

Überblick	10
1. Trichromatische Farbwahrnehmung - Von der Retina zum Kortex	13
Farbwahrnehmung im Alltag	13
Frühe Theorien der Farbwahrnehmung	14
Die Retina	15
Retinale Ganglienzellen	18
Magno- und Parvozelluläres System	21
Corpus Geniculatum Laterale	22
Der DKL-Raum und seine Neuronalen Korrelate	24
Visueller Kortex	26
Segregation und Integration höherer kortikaler Areale	27
Chromatische Eigenschaften kortikaler Zellen	29
Farbkonstanz	30
Psychophysik	34
Gibt es ein Farbzentrum in Gehirn?	35
Klinisches Bild der Achromatopsie	39
2. Die Farbttestbatterie	43
Voruntersuchung	43
Testbatterie für verschiedene Teilleistungen der Farbwahrnehmung	49
Diskrimination – Unterscheiden farbiger Reize	52
Kategorisierung – Benennen farbiger Reize	55
Farbkonstanz – Wahrnehmung farbiger Reize in unterschiedlichen Umgebungen	56
Transparenz	62
Bedingungen zur Transparenzwahrnehmung	64
Die Transparenzaufgabe	68
Wahl der Parameter für die Transparenzaufgabe	73
Vorversuch: Antwort auswählen oder einstellen	73
Vorversuch: Bearbeitungszeit unbegrenzt	77
Welchen Alpha-Wert für den Filter?	78
Vorversuch: Bearbeitungszeit zehn Sekunden	81
Vorversuch: Hintergrund der achromatischen Version – schwarz	83
Vorversuch: Hintergrund der achromatischen Version – mittleres grau	85

Zusammenfassung der Vorversuche.....	87
Versuch: Farbkonstanz und Anpassungsleistung	87
3. Normierung.....	96
Kriterien der Voruntersuchung.....	96
Methode.....	97
Teilnehmer.....	97
Durchführung	98
Ergebnisse.....	98
Vergleich der Ergebnisse von Detektion, Diskrimination und Farbkonstanz	98
Ergebnisse Detektion: Vergleiche zwischen den Gruppen.....	102
Ergebnisse Diskrimination: Vergleiche zwischen den Gruppen.....	105
Ergebnisse Detektion und Diskrimination: Vergleiche innerhalb der Gruppen...	107
Ergebnisse Farbkonstanz: Vergleiche zwischen den Gruppen.....	108
Beschreibung der Kategorisierungsergebnisse.....	110
Kategorisierung der 20-30 jährigen.....	111
Kategorisierung der 40-50 jährigen.....	112
Kategorisierung der 50-60 jährigen.....	112
Kategorisierung der 60-70 jährigen.....	113
Diskussion	114
4. Klinische Stichprobe.....	116
Kontaktaufnahme mit der Klinik.....	116
Ethikantrag	117
Einschlusskriterien für die Patientenstudie.....	117
Patientenkontakt	118
Versuchsaufbau	119
Mobiles Labor	119
Monitor und Rechner.....	121
Teilnehmer.....	122
Kriterien der Voruntersuchung.....	122
Durchführung	123
Ergebnisse.....	124
Ergebnisse der Patientenstichprobe in Detektion, Diskrimination, Kategorisierung und Farbkonstanz.....	124
Darstellung der Patientenfälle	128

Leistungsdefizite in Detektion und Diskrimination.....	129
Patient KK.	129
Patientin VB.	131
Patient SB.	132
Patient EL.	134
Läsionsanalyse der Patienten KK, VB, SB, EL.....	135
Leistungsdefizite ausschließlich in Diskrimination.....	136
Patientin JH.	136
Patient DH.	138
Läsionsanalyse der Patienten JH, DH.....	139
Leistungsdefizite in Kategorisierung und Diskrimination.....	140
Patientin MR.....	140
Patient GW.	142
Patientin JP.	143
Patient SB und Patient EL.	144
Läsionsanalyse der Patienten MR, GW, JP, SB, EL	145
Leistungsdefizite in Farbkonstanz.....	146
Patientin MR.....	146
Patient AB.	146
Patient KK.	147
Patient MaS.	148
Patient WH.	149
Patientin AS.....	151
Patientin KN.	152
Patient HP (Ausschluss).	154
Läsionsanalyse der Patienten MR, AB, KK, MaS, WH, AS, KN.....	154
Läsionsanalyse der Patienten ohne Auffälligkeiten.....	155
Diskussion	157
5. Prototypische Achromatopsiepatienten	159
Fallgeschichte des Patienten M.S.	159
Residualleistungen des Patienten M.S.....	161
Patient M.S. in unserer Testbatterie.....	170
Patient Y.E. in unserer Testbatterie	174
6. Farbwahrnehmung in der retinalen Peripherie	178

Methode	188
Versuchspersonen	188
Material	188
Kalibrierung	189
Stimuli	190
Detektionsschwellen bei Excentrizitäten bis 50°	191
Detektion und Identifikation	193
Detektionskontur	194
Diskriminationskontur	196
Diskussion	198
Zusammenfassende Diskussion	200
Literaturverzeichnis	202
Digitale Quellen	213
Appendices	214
Erklärung	236

Überblick

Die vorliegende Dissertation gibt einen kurzen Überblick über die trichromatische Farbwahrnehmung des Menschen. Zu Beginn werden frühe Theorien zur Farbwahrnehmung vorgestellt sowie die einzelnen Verarbeitungsstufen des visuellen Systems erläutert. Nach einer Übersicht über die funktionelle Neuroanatomie der Retina und retinaler Ganglienzellen werden die beiden Systeme magno- und parvozellulärer Verschaltung erläutert. Weitere Stufen bilden das Corpus Geniculatum Laterale, der visuelle Kortex und höhere kortikale Areale. Der DKL-Raum einschließlich seiner neuronalen Korrelate wird dargestellt, ebenso wie die chromatischen Eigenschaften kortikaler Zellen.

Studien über selektive Funktionszentren im Gehirn wurden bereits an Kriegsverletzten durchgeführt, die eine Läsion durch eine Schussverletzung erlitten hatten. Wie für verschiedene andere Funktionen wurde auch ein Zentrum speziell für Farbwahrnehmung postuliert. Seit den siebziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts wurde diese Annahme systematisch befohrt. In der Diskussion um ein Farbzentrum im Gehirn werden wir Argumente für und wider ein Farbzentrum im Gehirn betrachten und aktuelle Ergebnisse ergänzen. Der Trend aktueller Forschung geht jedoch tendenziell von dem Ansatz eines speziellen Zentrums für einzelne Funktionen weg, da das Zentralnervensystem bei Verletzungen Funktionsausfälle erstaunlich gut plastisch kompensieren kann.

Der methodische Kern der vorliegenden Dissertationsschrift wird gebildet von einer Untersuchung an 28 neurologischen Patienten mit einer eigens entwickelten Testbatterie. Mittels dieser können verschiedene Teilleistungen des Farbsehens erfasst werden. Dazu gehören das Entdecken, das Unterscheiden und das Identifizieren farbiger Reize. Ein ausführliches Kapitel ist verschiedenen Aufgaben zur Farbkonstanz

gewidmet, wie illusorische Beleuchtung und Transparenz. Die Patientenergebnisse werden mit einer Normstichprobe von 70 Patienten verglichen, die verschiedenen Lebensaltern von 20 bis 70 Jahren entstammen. In der anschließenden Läsionsanalyse untersuchen wir Assoziationen und Dissoziationen zwischen den einzelnen Testleistungen und den verletzten neuronalen Korrelaten. Wir erwarten, dass ein pauschaler Ausfall der Farbwahrnehmung als Konstrukt nicht haltbar ist. Farbwahrnehmung ist ein komplexer Leistungsbereich, dessen einzelne Anteile betrachtet werden sollte. Unsere Unterteilung in einzelne Aufgabengebiete ist ein Beginn, der weiter differenziert und ergänzt werden kann.

Das klinische Bild der zerebralen Achromatopsie wird in einem historischen Abriss erläutert. Es ermöglicht detaillierte Betrachtung der residualen Funktionen. Wir konnten unsere Testbatterie an zwei prototypischen Patienten mit zerebraler Achromatopsie in England anwenden.

Während wir die Verarbeitung höherer kortikaler Regionen mittels der Patientenstudien untersuchen, wurde eine Experimentserie der Untersuchung farbverarbeitender Mechanismen in der Retina gewidmet. Obwohl schon in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts Untersuchungen bewiesen, dass Farbwahrnehmung in der Peripherie bis 90° möglich ist, herrscht immer noch die gängige Lehrmeinung vor, dass Farbwahrnehmung außerhalb der Fovea kaum oder gar nicht möglich sei. Diese obsoletere Ansicht wird auch durch aktuelle Forschung häufig unterstützt. Unsere Untersuchung zielt auf eine Revision dieser Annahme ab. Um den neuroanatomischen Gegebenheiten in der retinalen Peripherie gerecht zu werden, müssen Stimuli ausreichender Größe verwendet werden. Präsentationen in einer sphärischen statt einer planen Fläche sollen einen bestmöglichen Versuchsaufbau gewährleisten.

In der Zusammenfassung widersprechen wir der Annahme der Farbwahrnehmung als einheitliches Konstrukt und eines neurologischen Korrelates dieser. Vielmehr zeigen sowohl die Läsionsanalysen an neurologischen Patienten als auch die Gesichtsfelduntersuchungen an gesunden Probanden, dass Farbwahrnehmung in separate Konstrukte zerfällt, die einzeln gemessen werden können und müssen.

1. Trichromatische Farbwahrnehmung - Von der Retina zum Kortex

Farbwahrnehmung im Alltag

Farbe ist eine allgegenwärtige Wahrnehmung unserer Welt bei Tageslicht. Wir verwenden sie für Zeichen und Signale und um Aufmerksamkeit auf oder weg von relevanten Informationen zu lenken. Wir verwenden Farbe aus ästhetischen Gründen in Kunst und Kultur oder um unsere Emotionen durch Wahl unserer Kleider oder im Schaffen von Kunstwerken auszudrücken. Die Entwicklung von Farbe in Film, Fernsehen und Fotografie haben eine neue Dimension der Darstellung eröffnet. Die Wahrnehmung von Farbe hat wichtige Auswirkungen, um Objekte und Formen zu erkennen (Wurm et al., 1993). Eine evolutionäre Erklärung ist die Notwendigkeit für Herbivoren, rote und reife Früchte von grünen Blättern unterscheiden zu können (Mollon, 1989). Der evolutionäre Vorteil besteht darin, dass Früchte gehaltvoller sind als Blätter und wesentlich mehr Energie und Zeit aufgewendet werden muss, um eine vergleichsweise Menge an Nährstoffen nur durch das Essen von Blättern aufzunehmen. Alternative Erklärungen favorisieren die Funktion von Farbe als Signal für sexuelle Empfängnisbereitschaft und zur Verbesserung des Gedächtnisses beim visuellen Wiedererkennen (Heywood & Kentridge, 2003, Wichmann, Sharpe & Gegenfurtner, 2002). In anderen Worten, der bedeutendste Gewinn, den Farbe für unser visuelles System liefert, ist Objekte schneller zu erkennen und besser zu erinnern (Gegenfurtner & Rieger, 2000). Farbe ist ebenfalls bedeutsam, um Information über Emotionen und Warnungen zu liefern und unterstützt dadurch überlebenswichtige Aufgaben (Jacobs, 1993). In der einfachsten Definition ist Farbe diejenige Qualität, die uns hilft, Oberflächen gleicher Helligkeit voneinander zu unterscheiden.

Frühe Theorien der Farbwahrnehmung

Im 19. Jahrhundert wurden die ersten Theorien zur Farbwahrnehmung, die bis heute Bedeutung in der Farbforschung haben, auf der Basis psychophysischer Daten erstellt. Laut Young's und Helmholtz's Dreifarbentheorie beruht Farbsehen auf drei Rezeptorsystemen, welche jeweils bei unterschiedlichen Wellenlängen ihr Reaktionsmaximum haben. Durch Verrechnung der jeweiligen Ausgänge der drei Zapfentypen kann Farbe wahrgenommen werden.

Herings Gegenfarbentheorie postuliert drei Mechanismen, die für unsere Farbwahrnehmung verantwortlich sind. Jeder Mechanismus reagiert entgegengesetzt auf Licht unterschiedlicher Wellenlänge, wodurch ein Farbeindruck entsteht. Hering unterschied die drei Gegenfarben-Kanäle Schwarz-Weiß, Rot-Grün und Blau-Gelb.

Die Wahrnehmung von Farbe basiert auf den drei Komponenten Farbton, Sättigung und Helligkeit. Die folgenden Werte beziehen sich auf einen neurologisch unbeeinträchtigten Farbtüchtigen ohne besondere Ausbildungen auf dem Gebiet der Farbherstellung oder -unterscheidung, wie z. B. im Druckgewerbe, im Kunstgewerbe oder bei italienischen Mosaiklegern. Ein gesunder Mensch kann etwa 200 Farbtöne unterscheiden. Die Sättigung gibt an, inwiefern sich eine Farbe von einem neutralen Grau unterscheidet. Mit bloßem Auge unterscheidet man etwa 20 Sättigungswerte. Die Helligkeit wird durch die Menge des reflektierten Lichts bestimmt. Sie lässt sich psychophysisch in eine Skala aus 500 Helligkeitswerten auflösen (Eysel, 2003).

Die Retina

Sir Isaac Newton (1643-1727) sagte, "The rays of light are not colored. There is nothing in the rays but a certain disposition that gives a sensation of a certain color" (Newton, 1730/1952, S.124). In anderen Worten ist Licht elektromagnetische Energie, gemessen in Wellenlängen im sichtbaren Bereich zwischen 380 und 780 nm. Die Wahrnehmung von Farbe kann durch zwei Faktoren moduliert werden. Eine beleuchtete Oberfläche reflektiert das Licht je nach ihrer Beschaffenheit. Demnach kann ein weißes Blatt, welches mit langwelligem Licht bestrahlt wird, rötlich erscheinen. Ebenso kann ein rötliches Blatt Papier, welches mit weißem Licht bestrahlt wird, die gleiche Erscheinung annehmen. Wir können bei der Information, die die Retina erreicht, nicht mehr zwischen der Beleuchtung einer Oberfläche und deren Reflektanz unterscheiden. Dieses reflektierte Licht erreicht die Photorezeptoren der Retina, wird biochemisch registriert, elektrisch kodiert und über neuronale Ganglienschaltung im Zentralnervensystem weitergeleitet.

Es gibt zwei Arten von Photorezeptoren: die lichtempfindlichen Stäbchen und die weniger lichtempfindlichen Zapfen. Da alle Stäbchen dasselbe Absorptionsspektrum haben und bei Tageslicht gesättigt sind, also keine brauchbare Information liefern, ist Farbunterscheidung mit ihnen nicht möglich. Die Zapfen unterscheiden sich in drei verschiedene Typen (*Trichromatizität*), die bei unterschiedlichen Wellenlängen ihr Absorptionsmaximum haben. Die „short“- Zapfen (S- Zapfen) haben ihr Maximum bei 440nm. Die M-Zapfen („middle“) fallen mit ihrem Absorptionsmaximum in den mittelwelligen Bereich (535nm) und die L-Zapfen („long“) reagieren am stärksten auf langwelliges Licht (565nm). Die obsolete Bezeichnung von Rot-, Grün- und Blauzapfen zeigt sich hier als untauglich, da die Absorptionsmaxima von S-Zapfen bei Violett, M-Zapfen bei Grün und L-Zapfen bei Gelb liegen.

Die spektrale Absorptionsverteilung der Zapfen bildet die elementare Grundlage des trichromatischen Farbsehens. 1853 publizierte Grassmann zum ersten Mal, dass bei normaler Farbwahrnehmung drei Freiheitsgrade bestehen. König & Dieterici (1886) nahmen eine experimentelle Schätzung dieser Verteilungen vor, indem sie annahmen, dass sich die Zapfen Farbtüchtiger so verhalten, wie die verbleibenden Zapfen bei sogenannten Farbenblinden, genauer Protanope und Deuteranope. Ihre Schätzung war erstaunlich dicht an der heute gängigen Lehrmeinung, dargestellt in Abbildung 1.1 nach Stockman & Sharpe (2000).

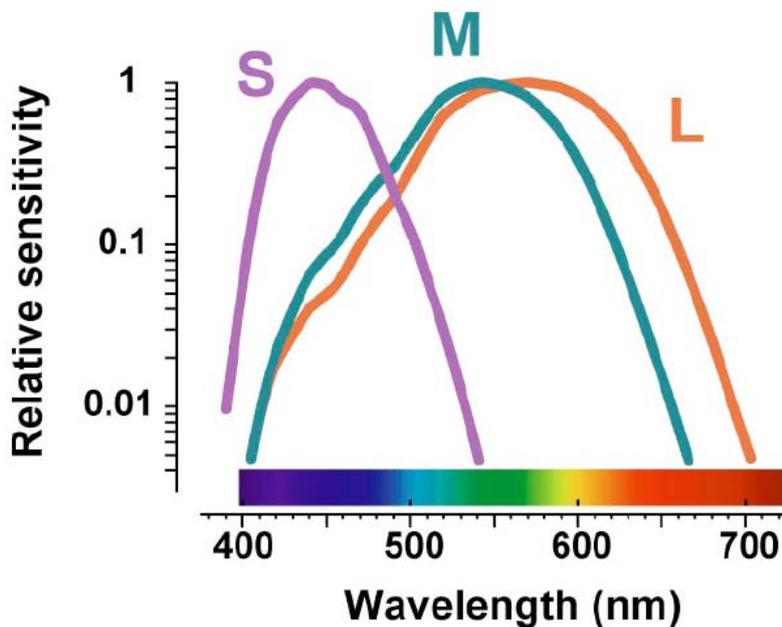


Abbildung 1.1: Spektrale Absorptionsverteilung der Zapfen.

Trichromatizität liegt nur beim Menschen und bei den “Alte Welt-Affen” vor, wie zum Beispiel Meerkatzen, Makaken, Pavianen und Menschenaffen. Die Wellenlängenspektren der L- und M-Zapfen haben einen bemerkenswert großen Überlappungsbereich. Dieser geringe Unterschied zwischen L- und M-Zapfen-Spektrum kann als Kompromiss interpretiert werden. Einerseits dient uns die Netzhaut zur

hochauflösenden Farbunterscheidung mittels Vergleich von L- und M-Zapfen, andererseits besteht die Notwendigkeit zu hoher Sehschärfe bei Helligkeit, wobei die beiden Zapfensysteme gleichwertig behandelt und ausgewertet werden (Gegenfurtner & Kiper, 2003).

S-Zapfen und Stäbchen sind phylogenetisch älter als L- und M-Zapfen. Die letztgenannten entwickelten sich erst vor 35 Millionen Jahren aus einem gemeinsamen Rezeptortyp (Gegenfurtner & Kiper, 2003). Die Gene dieser beiden Zapfen liegen heute aneinander angrenzend auf dem X-Chromosom und sind in ihrer genetischen Expression zu 98% identisch (Sharpe, Stockman, Jägle & Nathans, 1999).

Zapfen sind in der Retina ungleich verteilt. Ihre Verteilung hat ein Maximum in der Fovea (Abbildung 1.2 a) und nimmt zur Peripherie hin ab (Osterberg, 1935). Die Verteilung der Stäbchen spart die zentralen 5 mm der Fovea aus, die die zentralen 1.7 Grad Sehwinkel des Gesichtsfeldes repräsentieren. Wir haben mehr L-Zapfen als M-Zapfen, aber das Verhältnis variiert zwischen 0.25:1 bis 9:1. Brainard, Roorda, Yamauchi, Calderone & Metha (2000) fanden heraus, dass diese große Varianz keinen messbaren Effekt auf die Wahrnehmungswelt hat. Nur 10 % unserer Zapfen sind S-Zapfen. Sie sind spärlich verteilt und treten nur in der Peripherie auf. Sie sind gar nicht vorhanden in der Foveola, dem Punkt höchster Sehschärfe, ein Punkt von 300 µm auf der Netzhaut, der die innersten 0.34 Grad des Gesichtsfeldes ausmacht. Magnussen, Spillmann, Sturzel & Werner (2004) beschrieben die Kompensation dieses fovealen Blau-Skotoms als postrezeptorale Interpolation oder als Prozess neuronalen Filling-Ins. Die mosaikartige Verteilung der S-, M-, und L-Zapfen ist in Abbildung 1.2 b) an einem Beispiel zu sehen. Abgebildet ist der Bereich der Fovea, die im innersten keine S-Zapfen aufweist. S-Zapfen zeigen sich erstmals in der peripheren Retina.

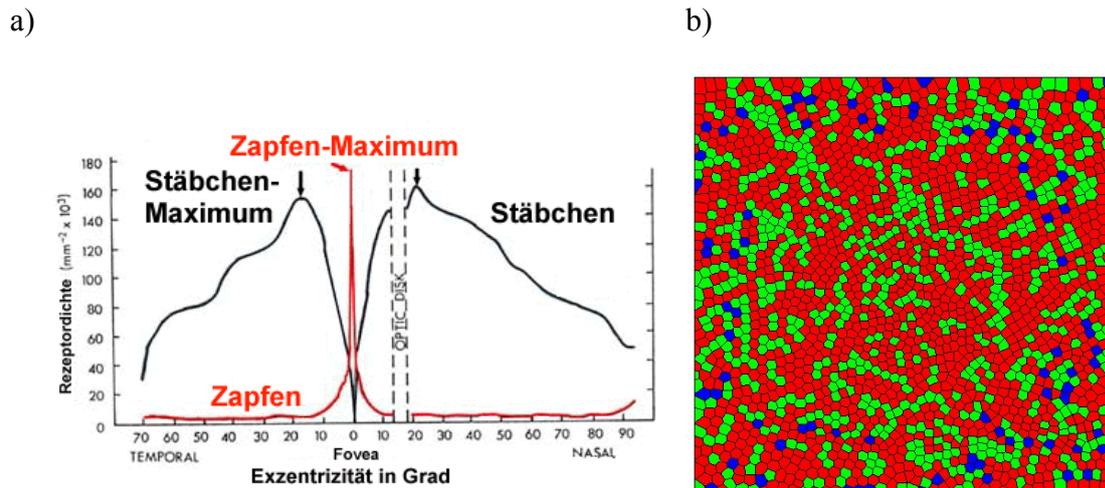


Abbildung 1.2: Verteilung und Verhältnis von Zapfen und Stäbchen (a) und Mosaik (b) der S-, M-, und L-Zapfen in der Fovea.

Zapfen reagieren nach dem Prinzip der Univarianz (Rushton, 1972). Der zugrundeliegende Prozess ist die Absorption von Licht, was zu einer photochemischen Antwort führt. Die evozierten elektrischen Signale korrespondieren mit der Anzahl absorbierter Photonen des jeweiligen Zapfens. Einmal absorbiert verbleibt nur die Information der Photonenanzahl, nicht die Wellenlänge, mit der das Licht auf den Rezeptor traf. Die Information von Wellenlänge als solches wird durch die Addition der drei Zapfenausgänge verworfen. Der Anstieg eines Zapfensignals kann also mehrere Ursachen aufweisen. Einerseits ist es möglich, dass die Art der Beleuchtung dichter an das Absorptionsmaximum des jeweiligen Zapfens herankommt, andererseits kann die Lichtintensität zunehmen. Als dritte Möglichkeit bleibt noch die Kombination beider vorangegangener Möglichkeiten.

Retinale Ganglienzellen

Retinale Ganglienzellen haben konzentrisch arrangierte rezeptive Felder. Das rezeptive Feld eines Neurons ist der Bereich des Sehfeldes bzw. die korrespondierende

Fläche der Netzhaut, innerhalb derer ein visueller Reiz die Impulsfrequenz des jeweiligen Neurons beeinflussen kann. Die rezeptiven Felder sind am kleinsten in der Fovea Centralis. Die Auflösung der Sehschärfe ist am höchsten in diesem Bereich. Je peripherer visueller Reize auf der Retina abgebildet werden, umso größer werden die rezeptiven Felder (Birbaumer & Schmidt, 1999). Die Axone der Retina verlassen das Auge als Nervus Opticus in Richtung Thalamus und weiter zum primären, visuellen Kortex. Der zugrundeliegende Prozess der Informationsübermittlung ist eine Änderung des Ruhepotentials der beteiligten Zellen. Jeder Lichtimpuls ändert die Aktivität des Zentrums oder der Peripherie eines rezeptiven Feldes hinsichtlich Inhibition (Hemmung) oder Exzitation (Erregung). Zwei Beispiele für rezeptive Felder im skotopischen Sehen sind On- und Off-Center-Neurone. On-Center-Neurone werden aktiviert, wenn das Zentrum beleuchtet wird und vermindern die Aktivität, wenn die Peripherie aktiviert wird. Off-Center-Neurone verhalten sich genau reziprok dazu. Auf die gleiche Weise, wie eine Lichtquelle auf diesen rezeptiven Feldern Exzitation oder Inhibition hervorrufen kann, führt auch die Reduktion von Beleuchtung zu dem entsprechend gegenteiligen Effekt. Das Ende eines Lichtreizes im Zentrum eines Off-Neurons erhöht den elektrischen Output. Die dritte Klasse sind On-Off-Neurone, die auf jede Änderung der Beleuchtung mit einem kurzen Überschuss reagieren. Ihre Antwort ist optimal auf bewegte Reizmuster ausgelegt.

Bei Breitbandzellen haben die Erregung von Zentrum und Peripherie die gleiche Wirkung, bei Gegenfarbzellen hat die Beleuchtung der Peripherie gegenteiligen Effekt zur Beleuchtung des Zentrums. Dieselbe Funktion, die laterale Inhibition für Helligkeitszellen hat, findet sich auch im Funktionsprinzip der Doppel-Gegenfarbzellen. Als Doppel-Gegenfarbzellen bezeichnet man Zellen, die den Farbkontrast im Zentrum und in der Peripherie messen (Abbildung 1.3).

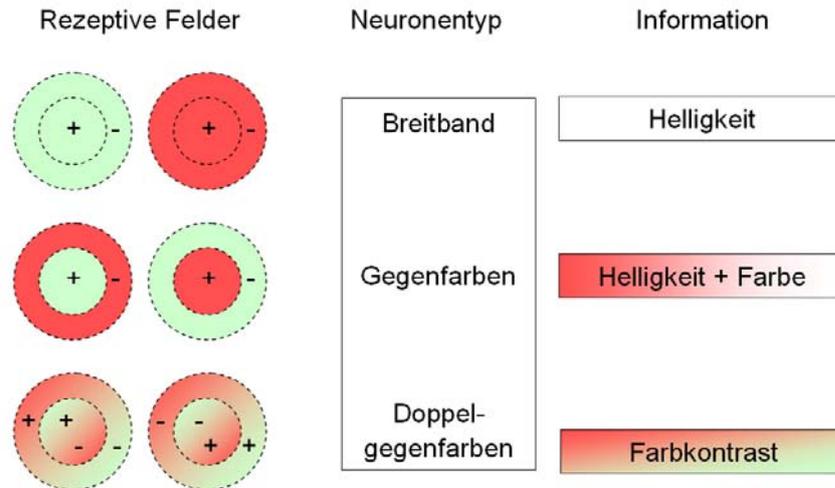


Abbildung 1.3: Zelltypen und ihre rezeptiven Felder (nach Klinke & Silbernagel, 1994).

Die rezeptiven Felder von Gegenfarbennetzen haben die gleiche zirkuläre, antagonistische Orientierung. Anstatt eines Hell-Dunkel-Antagonismus reagieren diese Zellen auf rot-grün oder blau-gelb. Das Zentrum eines Rot-Grün-Neurons kann durch Rot aktiviert werden, während die Peripherie auf Grün anspricht oder vice versa. Das gleiche gilt für Blau und Gelb. Doppelgegenfarbennetzen können sowohl im Zentrum als auch in der Peripherie hemmend sowie erregend sein. Diese Art von Zelltyp lässt sich vermehrt in V1 nachweisen. Gegenfarbennetzen wurden von Gouras (1968) in der Retina von Affen untersucht.

Bei den farbentüchtigen Säugetieren sind die oben beschriebenen drei Zapfentypen mit den nachfolgenden retinalen Nervenzellen so verschaltet, dass neben dem achromatischen Sehen zwei farbspezifische, antagonistische Gegenfarbennetzsysteme aktiviert werden, die ein Vierfarbennetzsystem mit den Gegenfarben Rot-Grün und Gelb-Blau bilden. Diese Organisation ist auch noch im Endigungsgebiet dieser Nervenfaser, im CGL nachweisbar.

Magno- und Parvozelluläres System

Retinale Ganglienzellen werden in Magno- (auch Parasol- oder Schirmzellen), Parvo- (auch Midget- oder Zwergzellen), und Konio-Zellen klassifiziert. Das Magnozellular System enthält α -Neurone (I-, Y-Neurone). Zu den magnozellularen Charakteristiken gehören große rezeptive Felder, das heißt geringe Auflösung, kurzdauernde Antworten auf Lichtreize und schnelle Weiterleitung. Die großen Dendritenbäume dieser Zellen können Informationen von vielen Bipolarzellen aufnehmen und damit große Objekte und deren Bewegung lokalisieren. Im CGL enden die Axone ebenfalls weitverzweigt, wodurch die funktionelle und morphologische Besonderheit dieses Zelltyps erhalten bleibt. Funktionell rechnet man diese Zellen dem achromatischen Bewegungswahrnehmungsapparat zu (Zilles & Rehkämper, 1998).

Die β -Neurone (II-, X-Neurone) des Parvozellulären Systems sind dünn und markhaltig. Das Parvozelluläre System zeichnet sich durch kleine rezeptive Felder, hohe Auflösung und langsame Weiterleitung aus. Diese Zellen bilden den größten Teil retinaler Ganglienzellen und projizieren zum Corpus Geniculatum Laterale, zum Colliculus Cranialis, zur Area Praetectalis und zum Nucleus Suprachiasmaticus. Nach klassischer Lehrmeinung leiten diese Zellen Informationen über Form und Farbe von Objekten weiter (Zilles & Rehkämper, 1998). Diese Dichotomie in Farb- und Bewegungswahrnehmung wird heute nicht mehr streng dogmatisch aufrechterhalten. Heute wissen wir, dass weder der Magnopfad völlig farbenblind, noch der Parvopfad völlig bewegungsblind ist.

Interaktionen zwischen diesen beiden Pfaden beschreiben Cowey und Heywood (1997). Wenn man bewegte farbige Muster betrachtet, dann scheint sich die Geschwindigkeit zu verringern, wenn die Farben isoluminant gehalten werden. Dies

liegt an der geringen Farbsensitivität des Magno-Pfades und an der geringen Bewegungssensitivität des Parvo-Pfades.

Die γ -Neurone (III-, W-Neurone) des Konio-zellulären Systems sind dünn, marklos und erfüllen eine essentielle Funktion im vegetativen Nervensystem, wie Pupillenmotorik. Alle drei Systeme haben On-, Off- und On-Off Neurone (Birbaumer & Schmidt, 1999).

Man unterteilt die Aufgaben der Farbwahrnehmung in den drei Zellsystemen wie folgt: magnozellular – Helligkeit, parvozellular – Rot-Grün, koniozellular – Blau-Gelb (Gegenfurtner, 2003). Die auf retinaler Ebene beginnenden Systeme magno- und parvozellulärer Verarbeitungspfade setzen sich im CGL fort.

Corpus Geniculatum Laterale

Die meisten Fasern des Tractus Opticus enden im Corpus Geniculatum Laterale (Abbildung 1.4), welches im hinteren Teil des Thalamus dem Metathalamus liegt und die wichtigste Umschaltstation auf dem Weg zum visuellen Kortex darstellt. 90% der Fasern des Sehsystems laufen durch das CGL. Der Rest läuft unter anderem durch die Colliculi superiores der Lamina quadrigemina, des Tectums im Mesencephalon. Der Tractus Opticus führt nach dem Chiasma Opticum die Fasern des nasalen Teiles der Retina des contralateralen Auges und die Fasern des lateralen Teils der Retina des ipsilateralen Auges. Somit ist immer der contralaterale Teil des Gesichtsfeldes im Corpus Geniculatum Laterale einer Seite repräsentiert (Polyak, 1957).

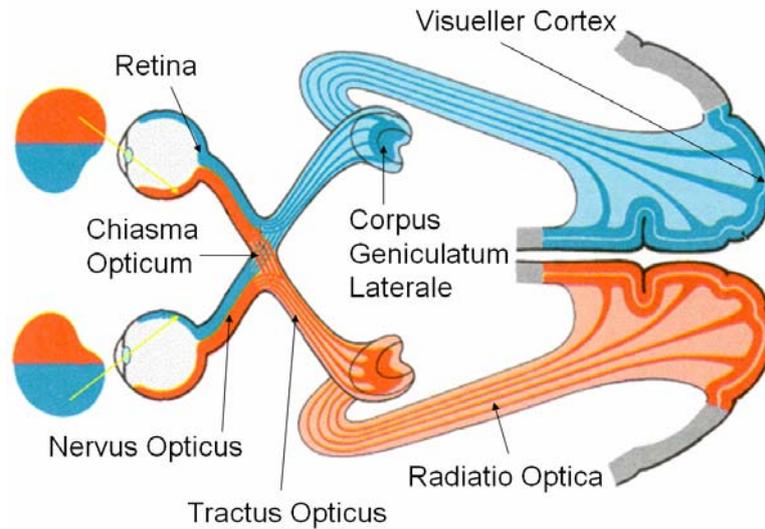


Abbildung 1.4: Visuotopik der Optikusfasern (Abbildung aus Kahle & Frotscher, 2001).

Das Corpus Geniculatum Laterale besteht aus sechs Schichten (Abbildung 1.5), die entweder aus dem ipsi- oder contralateralen Auge Afferenzen erhalten. Es besteht keine neuronale Verknüpfung zwischen diesen Schichten, deshalb gibt es hier auch noch keine binokulare Interaktion (Birbaumer & Schmidt, 1999). Die Schichten 2,3 und 5 erhalten Information aus dem ipsilateralen Auge. Die Schichten 1, 4 und 6 empfangen Input vom contralateralen Auge. Zur zytoarchitektonische Struktur des CGL gehört, dass die Schichten 1 und 2 magnozellularäre Efferenzen der Retina empfangen. Das Parvosystem projiziert in die Schichten 3 bis 6.



Abbildung 1.5: Das Corpus Geniculatum Laterale und seine Schichtung.

Zu Beginn der achtziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts bahnten Adaptationsstudien den Weg für den DKL-Raum. Krauskopf, Williams & Heeley untersuchten 1982 potentielle Kardinalachsen im Farbraum und nahmen zwei chromatische und eine Helligkeitsachse im Farbraum an. Wenn Versuchspersonen entlang einer dieser Achsen habituierten, dann waren danach die Schwellen für Testreize entlang dieser Achse erhöht. Die Schwellen für Lichtreize anderer Achsen im Farbraum blieben davon unbeeinträchtigt. Adaptation an Farbachsen zwischen den postulierten Kardinalachsen führte nur zu einer unspezifischen Schwellenerhöhung über alle Farben hinweg. In Ableitungsstudien an acht Makaken zeigten Derrington et al. (1984), dass diese Farbpräferenzen durch eine Selektivität auf Ebene des CGL entstehen. Gegenstand dieser Untersuchung waren 101 Zellen, deren Ableitung zeigt, dass diese Neurone sowohl eine Helligkeitspräferenz aufweisen können als auch sich um einen von vier Farbtönen clustern. Diese Farbtöne bilden Gegensatzpaare des DKL-Raumes und stehen orthogonal zueinander. Diese Kardinalachsen sind jedoch nicht mit den von Hering postulierten Gegenfarbemechanismen identisch (Gegenfurtner & Kiper, 2003).

Der DKL-Raum und seine Neuronalen Korrelate

Die Verschaltung der drei retinalen Zapfensysteme wird veranschaulicht durch den DKL-Raum, wie er von Derrington, Krauskopf und Lennie 1984 publiziert wurde. Die Namen der drei Autoren dienten auch gleichzeitig zur Namensschöpfung („D-K-L“) dieses Raumes.

Um die Weiterleitung zum Gehirn zu optimieren, werden die Signale der Zapfen dekorreliert, d. h. die Aktivität wird in drei Gegenfarbenkanäle umkodiert. Im Helligkeitskanal wird die Summe aus den M- und L-Zapfen gebildet (L+M). Die

Differenz zwischen diesen beiden Zapfentypen wird als Rot-Grün-Information interpretiert. Die Differenz zwischen S-Zapfen und der Summe aus L+M wird als Gelb-Blau interpretiert. Abbildung 1.6 a) zeigt die neuronale Struktur der verschalteten Ganglienzellen, um Gegenfarben- und Helligkeitsinformation zu erhalten.

Im DKL-Raum sind die zwei chromatischen Achsen L-M und S-(L+M) orthogonal arrangiert. Der Mittelpunkt symbolisiert den sogenannten energiegleichen „Weißpunkt“. Im rechten Winkel dazu verläuft die Helligkeitsachse (Abbildung 1.6 b). Die Sättigung ist im Weißpunkt am geringsten und nimmt zu, je weiter man sich von der Mitte zum äußeren Rand bewegt. Alle Farben, die auf einer Ebene liegen, wie in der Abbildung 1.6 b) gezeigt, haben die gleiche Helligkeit, sind also iso- bzw. equiluminant. So entspricht in sphärischen Koordinaten die Amplitude der Sättigung, der Azimuth dem Farbton und die Elevation der Helligkeit.

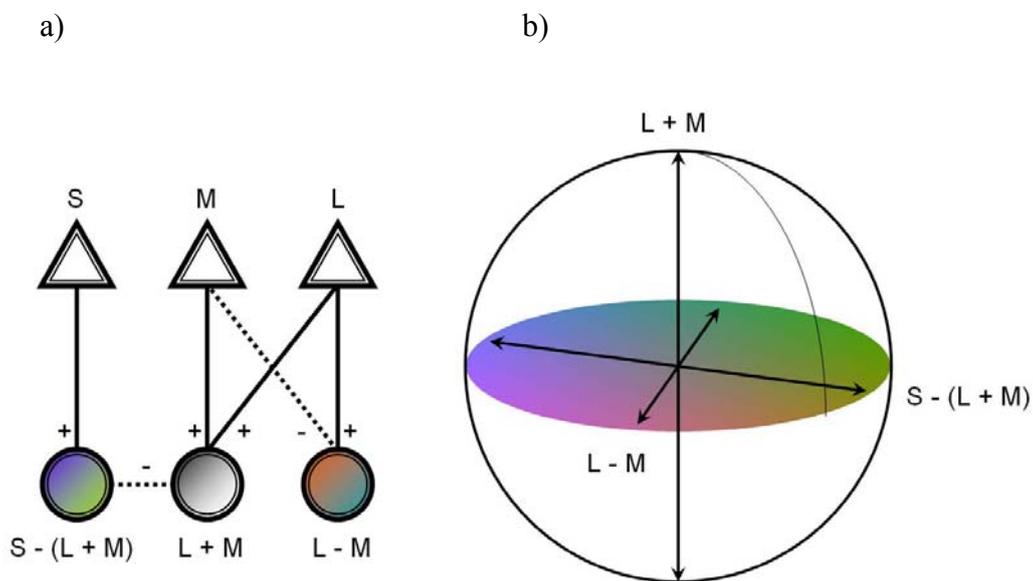


Abbildung 1.6: a) Schema neuronaler Verschaltung der Ganglien in der Retina b) Die Achsenanordnung des DKL-Raumes.

Im Folgenden werden häufig Angaben in kartesischen Koordinaten gemacht. Hierbei ist die Achsenskalierung arbiträr. Die Achsen haben ein Maximum von [+1] und ein Minimum von [-1]. Der Nullpunkt ist der Mittelpunkt der Kugel. X-Koordinaten entsprechen der L-M-Achse. Ihre Reize erscheinen rot und grün, wobei positive Werte für Rot und negative für Grün stehen. Y-Koordinaten entsprechen der S-(L+M) Achse und erscheinen im Reizmaterial blau und gelb, wobei positive Werte für Gelb und negative für Blau stehen. Z-Koordinaten geben eine Änderung der Helligkeit an. Der Wert [-1] bedeutet Schwarz und [+1] Weiß. Der Nullpunkt ist also mittleres Grau.

Es muss angemerkt werden, dass im DKL-Raum keine prototypischen Farben vorliegen, wie wir sie aus unserem alltäglichen Leben kennen. Wir sehen hier eher pastellartige Töne. Das DKL-Rot entspricht eher einem Altrosa, das DKL-Grün erscheint aquamarinblau bis türkis. Das DKL-Gelb hat eine olive Nuance und DKL-Blau erscheint hellviolett oder fliederfarben. Trotzdem werden diese Farben im folgenden Text als Rot, Grün, Gelb und Blau bezeichnet.

Visueller Kortex

Der primäre visuelle Kortex (V1) ist ebenfalls in sechs Schichten (1, 2/3, 4A, 4B, 4C α , 4C β , 5, 6) strukturiert (Shevell, 2003). Diese Schichtung war namensgebend für die Bezeichnung „striärer Kortex“, was im engen Sinne nur V1 bezeichnet. Alle höheren kortikalen Regionen nach V1 werden als „extrastriärer Kortex“ bezeichnet. Das parvozelluläre System sendet Information in die Schichten 4C β , 4A und 1. Die Zellen dieser Schichten projizieren innerhalb des visuellen Kortex weiter nach 2/3. Das Magnozellan System zieht nach 4C α und nach 4B bildet hier den makroskopisch sichtbaren, breiten Gennari-Streifen (Zilles, Rehkämper, 1998). Das interlaminäre

System entspringt im CGL zwischen den kleinzelligen Schichten, weshalb es oft in den Lehrbüchern dem Parvosystem zugerechnet wird. Diese Fasern ziehen direkt in die Schichten 1, 2 und 3.

Im sekundären visuellen Kortex (V2) entspricht das Magnosystem den Cytochromoxidase-aktiven, dicken Bändern, das Parvosystem den blassen Zwischenbändern und den Cytochromoxidase-aktiven, dünnen Bändern. Das Koniosystem zieht nur in die Cytochromoxidase-aktiven, dünnen Bänder. (Hubel & Livingstone 1987). Früher ordnete man diesen Strukturen funktionelle Entsprechungen zu: Bewegung und Tiefenwahrnehmung in den dicken Bändern, Form in den blassen Bändern und Farbe in den dünnen Bändern. Diese Aufteilung wird heute als obsolet betrachtet. Neurone in V2 beschränken sich nicht nur auf eines der Reizattribute. Es gibt keine strikte Aufteilung der visuellen Information in diesen parallelen Verarbeitungsbahnen (Gegenfurtner & Kiper, 2003).

Segregation und Integration höherer kortikaler Areale

Nach V2 gehen die Verarbeitungspfade in zwei unterschiedlichen Pfaden visueller Verarbeitung weiter. Die Existenz zweier unterschiedlicher Pfade wurde bereits 1982 von Ungerleider und Mishkin formuliert (nach Milner & Goodale, 1995). Es gibt im Kortex einen dorsalen Pfad, der räumliche Information weiterleitet und einen ventralen Pfad, der die Objekterkennung steuert. Ausgehend vom primären visuellen Kortex läuft der eine Strang dorsal bis zum hinteren Teil des Parietalkortex. Der andere Pfad verläuft ventral bis zum temporalen Kortex. Ungerleider und Mishkin formulierten die Unterschiede dieser beiden Funktionen als Erkennen einer Antwort auf die Frage „Wo?“ im dorsalen Pfad und eine Bearbeitung der Frage „Was?“ im ventralen Pfad. Die neuroanatomische Existenz dieser unterschiedlichen Bahnen ist seitdem durch eine

Vielzahl von Experimenten gestützt worden. Milner und Goodale (1995) erweiterten das Modell von Ungerleider und Mishkin. Sie formulierten eine Unterteilung in *Wo?* vs. *Wie?*. Der dorsale Pfad bereitet über die räumliche Information die Steuerung der Motorik vor. Er ist der Strang, der für die Aktionsplanung zuständig ist. Über den ventralen Pfad wird durch die Objekterkennung die subjektive Wahrnehmung gebildet. Diesem Pfad rechnet man auch Informationen wie das Erkennen von Farben zu. Milner und Goodale bildeten daraus das ergänzende Paar von *Action vs. Perception*. Diese strenge Zweiteilung von Verarbeitungspfaden ist mittlerweile revidiert worden, da zwischen ihnen viele Assoziationen und Projektionen vorliegen. Beide Pfade wirken wechselseitig aufeinander ein und können auch den gleichen Täuschungen unterliegen (Braun, Pracejus & Gegenfurtner, 2006).

Dem dorsalen Pfad werden Gehirnareale zugerechnet wie V3 (visuelles Areal 3), MT (medial temporales Areal), MST (medial superior temporales Areal), VIP (ventral intraparietales Areal) und LIP (lateral intraparietales Areal). Zum ventralen Pfad rechnet man Gebiete wie V4 (visuelles Areal 4), PIT (posterior inferotemporales Areal) und CIT (zentral inferotemporales Areal). Keiner dieser beiden Pfade ist völlig farbenblind, aber sie unterscheiden sich in der Weise, wie sie Farbe verarbeiten. (Gegenfurtner & Hawken, 1996). Heute werden beide Pfade auf Interaktionen und Dissoziationen intensiv beforscht. Zwei Richtungen sind heute vorherrschend. Die eine, welche versucht die Unterschiedlichkeit beider Pfade zu beweisen, die andere, welche starke funktionale Verknüpfungen hervorzuheben versucht. Oftmals erbringen beide Richtungen ähnliche Ergebnisse, interpretieren sie aber mit unterschiedlichen Schlussfolgerungen. Dem ventralen Pfad wird das Areal V4 zugeordnet, welches in der Vergangenheit häufig als „*Farbzentrum*“ in der Literatur diskutiert wurde (siehe unten).

In vergleichenden Studien zeigt sich, dass sich Kortikale Areale wie V1, V2, V3, V4, PITd und TEO nicht in ihrer Selektivität gegenüber Farbe oder Helligkeit unterscheiden. Der Anteil selektiver Zellen ist in diesen Arealen für beide Eigenschaften etwa gleich groß. Eine Ausnahme bildet das Areal MT, das eine höhere Sensitivität für Reizmaterial unterschiedlicher Helligkeit aufweist.

Chromatische Eigenschaften kortikaler Zellen

Zellen, die Informationen aus L- und M- Zapfen summieren, nennt man „Helligkeitszellen“, jene, die L-, M- und S-Zapfen Informationen subtrahieren, nennt man „Farbenzellen“. Auf der Basis dieser Definition kann man die Verteilung von farbsensitiven Zellen im Kortex wie folgt angeben. In Einzelzelleitungen an Makaken wurde festgestellt, dass 50 % der Zellen in V1, V2, V3 und V4 selektiv für Farbe sind. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Arealen sind vernachlässigbar gering. Dieses Verhältnis korrespondiert mit den Ergebnissen funktioneller Magnetresonanztomographie am Menschen (Gegenfurtner, 2003). Es gibt ein umfassendes Kontinuum von Zellen, die von strikter Präferenz für Farbe bis zu strikter Präferenz für Helligkeit reichen. Alle Arten von Abstufungen sind auf diesem Kontinuum gegeben. Daraus ist zu schließen, dass die Verarbeitung von Farbe und Helligkeit im Kortex nicht getrennt erfolgt.

Die aus magno- und parvozellulären Bereichen des CGL ankommende Information wird jetzt zum ersten Mal in V1 anatomisch verschaltet und verrechnet. Ab hier erhalten die nachfolgenden Kortexareale eine Mischung aus Parvo- und Magnoinformationen, so auch das Areal V4 (Cowey & Heywood, 1997).

Im Gegensatz zu den Zellen im CGL, die eine Präferenz für Farben in Kardinalrichtungen haben, zeichnet sich das Verhalten kortikaler Zellen zu farbigen

Reizen durch ihre Abstimmung (Tuning) aus. Zellen in V1 haben ein relativ breites Tuning auf farbige Reize, wohingegen Zellen in V2 sehr fein getunt sind (Gegenfurtner, 2003). Die bevorzugten Farben der Regionen V1 und V2 sind den Kardinalrichtungen, die im CGL gefunden wurden, nicht identisch (Gegenfurtner & Kiper, 2003).

Nach Zeki (1991) antworten Zellen aus V1 auf die physikalische Quantität der Wellenlänge, das Areal V4 antwortet jedoch auf den subjektiven, psychophysischen Eindruck der Farbe.

Farbkonstanz

Bereits 1886 erkannte Helmholtz, dass Farbe nicht nur durch spektrale Reflektion von Objekten, sondern auch von den Farben der Umgebung beeinflusst wird. Voraussetzung für Farbwahrnehmung und die damit verknüpften höheren kortikalen Leistungen ist, dass Zellen nur auf einen relativ begrenzten Farbbereich antworten. Einerseits kann sich die Wahrnehmung einer Farbe ändern, wenn sie in unterschiedliche andere Farben eingebettet wird. Dieses Verhalten der Wahrnehmung nennt man *Chromatische Induktion*. Auf der anderen Seite können unterschiedlich spektrale Verteilungen das trichromatische Zapfensystem so stimulieren, dass die beobachteten Farben gleich erscheinen. Diese Farben bezeichnet man als *metamerisch* und den subjektiven Eindruck dieser Reizmuster als *Farbkonstanz*. Farbkonstanz meint die Fähigkeit des visuellen Systems, eine Farbe trotz variierender Beleuchtungs- und Reflektionsbedingungen zu erkennen. Zum Beispiel erscheinen die Früchte eines ausgekippten Obstkorbs (Abbildung 1.7) immer in konstanter Farbe, gleich ob wir sie morgens im langwelligen Licht, also leicht rötlich sehen oder ob wir sie am Abend in bläuliches Licht getaucht wahrnehmen. Eine Banane erscheint uns immer gelb und eine Pflaume immer blau.



Abbildung 1.7: Früchte bei verschiedenen Beleuchtungen erscheinen immer in der „richtigen“ Farbe.

Dieser Leistung liegen verschiedene Prozesse zugrunde. Das visuelle Wahrnehmungssystem adaptiert relativ schnell an die Umgebung. Dadurch sinkt die Empfindlichkeit für die betreffende Farbe auf der Rezeptorebene. In anderen Worten ist dieses Neujustieren eine Nullpunktverschiebung. Adaptation ist kein Prozess der Ermüdung, sondern veränderter Wahrnehmung. Ein Organismus passt sich seiner spezifischen Umgebung möglichst gut an. Neuronal ist Adaptation als Absenken der Feuerrate eines Neurons bzw. eines Rezeptors bei konstanter Stimulation zu erklären. Jedoch reagieren alle Sinnessysteme unterschiedlich in ihrer Adaptation und können nicht verallgemeinert beschrieben werden. So kann man in einem lauten Raum an die Umgebungsgeräusche zwar adaptieren, diese jedoch jederzeit wieder durch Fokussierung der Aufmerksamkeit einblenden. Nach olfaktorischer Adaptation ist dies nicht möglich. Der Vorteil der Adaptation liegt in der Wahrnehmung relativer Umgebungsänderungen. Die kontinuierliche Wahrnehmung, beispielsweise des absoluten Geruchs eines Raumes, in dem man sich aufhält, ist langfristig eine wertlose Information. Die Adaption an diesen Geruch lässt den Wahrnehmenden sensibler

werden für relative Änderungen in seiner Umgebung, wie z. B. das Auftreten von Gerüchen toxischer Substanzen oder dem Geruch von Verbranntem. Daraus resultiert der Nachteil, keine verlässlichen Aussagen über die absoluten Umgebungsbedingungen mehr treffen zu können. Bei Szenen in unterschiedlich farbigem Licht geschieht eine ebensolche Adaptation an die Umgebungsbedingungen. Verschiedene Theorien behaupten, dass der Zustand der Adaptation auf eine bestimmte Stelle entweder von der lokalen Umgebung, dem räumlichen Durchschnitt oder der intensivsten Region des Bildes bestimmt wird. Kraft und Brainard (1999) sind durch Experimente zur Farbkonstanz unter diesen verschiedenen Umständen zu folgenden Schlüssen gekommen: Adaptiert eine Versuchsperson auf den Hintergrund, wirkt sie physikalischen Änderungen entgegen und hilft somit die Farbkonstanz aufrecht zu halten. Sie reagiert somit zu 100 % farbkonstant. Auch bei einer Änderung von Farbe und Beleuchtung in die gleiche Richtung führt Adaptation zur Farbkonstanz. Wenn sich Farbe und Beleuchtung aber in entgegengesetzter Richtung ändern, kann Farbkonstanz nicht mehr aufrecht gehalten werden. So muss zum Beispiel eine Zitrone in einer rötlichen Umgebung anteilig mehr rot enthalten, um nicht farblos und blass zu wirken, sondern um in ihrem typischen gelb zu erscheinen. Denn wenn sich die Beleuchtung einer Szene ändert, ändern sich auch die Farben des Hintergrunds und die der Objekte.

Auch zentrale Mechanismen spielen eine Rolle. Wird die Szene im gesamten Gesichtsfeld analysiert, so kann die Umgebungsbeleuchtung berechnet werden. Ohne diesen Korrekturmechanismus wäre die Kompensation nicht möglich und Objekte könnten nicht aufgrund ihres Farbtons wiedererkannt werden. Dies belegt Helmholtz' Annahme, dass der Eindruck eines Farbtons von den Farben des Kontexts abhängig ist bzw. dass Farbkonstanz einen Kontextzusammenhang beansprucht. Entscheidend ist also nicht die absolut wahrgenommene Farbe eines Objektes, sondern das relative

Verhältnis zu dem das Objekt umgebenden Hintergrund. Objekte unterschiedlicher Farbe können gleich erscheinen, wenn sie durch Licht verschiedener Wellenlänge unterschiedlich angestrahlt werden. Alternativ können diese Objekte auch auf verschiedenfarbigen Hintergründen dargeboten werden, was einem Eintauchen der Szene in eine bestimmte Beleuchtung gleichkommt. Diese vermeintliche Ähnlichkeit der zu beurteilenden Objekte liegt daran, dass der Farbunterschied zum Hintergrund hier identisch ist (Gegenfurtner, 2003).

Natürlich kann man einwenden, dass wir schlichtweg *wissen*, dass eine Banane gelb ist, auch wenn sie mit einer anderen Farbe beleuchtet wird. Diese *Gedächtnisfarbe* spielt auch eine entscheidende Rolle. Deshalb werden in Experimenten zur Farbkonstanz häufig abstrakte, geometrische Objekte verwendet, die theoretisch jede Farbe besitzen können und nicht durch Erfahrung und Erinnerungen in ihrem Erscheinungsbild vorbelastet sind.

Farbkonstanz ist ein vergleichsweise schneller Prozess. Nach 25 Sekunden sind 50 % der Anpassungsleistung an einen veränderten Hintergrund erfolgt. Diese Leistung ist zu schnell, um sie ausschließlich durch eine neuronale Adaptationsleistung zu erklären. Es ist ein Anpassungsmechanismus, der nicht primär auf eine Anpassung an graduelle Beleuchtungsänderungen wie zum Beispiel in der Dämmerung gedacht ist. Viel eher benötigen wir Farbkonstanz, wenn wir eine Blicksakkade auf eine neue Szene ausführen, die völlig anders ausgeleuchtet ist als die Ausgangsszene (Rinner & Gegenfurtner, 2002).

Farbkonstanz ist also eine Leistung, die nicht auf einen einzigen Mechanismus zurückzuführen ist, sondern hängt von Retina und Kortex ab. Es gibt eine weite Bandbreite der Interaktion zwischen den rezeptiven Feldern des CGL und V1. So wird V1 eine wichtige Rolle in der Farbkonstanz beigemessen. Diskutiert werden auch

Doppelgegenfarbenzellen in ihrer Bedeutung für Farbkonstanz. Zeki postulierte Zellen für Farbkonstanz in V4 (Gegenfurtner, 2003).

Psychophysik

In der Psychophysik werden festgelegte physikalische Stimulusbedingungen der Versuchsperson vorgelegt, die diese aufgrund ihres subjektiven Eindrucks beurteilt. Im Allgemeinen wird untersucht, welche Beziehungen und Gesetzmäßigkeiten zwischen Reizintensität und -qualität und Empfindungen bzw. Urteilen über Empfindungen bestehen.

Zur Erforschung der visuellen Systems werden als physikalischer Input Leuchtdichte, Wellenlänge, Bewegung, Disparität, Orientierung und Größe benutzt (Cowey & Heywood, 1997). Diese Faktoren werden subjektiv wahrgenommen, zum Beispiel Wellenlänge als Farbe. Der subjektive Sinneseindruck von Farbe hängt von der Wahrnehmung unterschiedlicher Parameter ab, wie Oberflächenbeschaffenheit, Bewegung, abstrakte Strukturierung und anderen mehr. Das Farbsystem ist ebenso leistungsfähig wie das Helligkeitssystem, aber es reagiert schneller und stärker, wenn die verwendeten Stimuli einen hohen Kontrast aufweisen (Gegenfurtner, 2003).

Da im Kortex die Analyse von Farbe und Helligkeit nicht separiert werden kann, müssen die Stimuli so beschaffen sein, dass nur das Farbsystem beansprucht wird und keine Helligkeitsinformationen das Beurteilen der Reize erleichtern. Zu diesem Zweck werden farbige Reize isoluminant dargeboten, das bedeutet, sie variieren nur in Farbton und Sättigung.

Gibt es ein Farbzentrum in Gehirn?

Die Debatte um ein spezielles Farbzentrum in Gehirn bringt auf beiden Seiten der Befürworter und Gegner immer wieder neue Publikationen hervor. Viele Studien versuchen ein extrastriäres Farbzentrum zu bestätigen. Zum einen finden sich Regionen wie V4, die mittels Magnetresonanztomographie (MRT) erhöhte Aktivierung bei der Verarbeitung farbiger Reize zeigen. Zum anderen scheinen diese Regionen nicht auf verschiedene Wellenlänge zu reagieren, sondern auf subjektiv wahrgenommene Farbe, was die Schlussfolgerung eines „Farbzentrums“ nahe legt (Zeki, 1973, 1977, 1978). Weitere Hinweise auf V4 als Farbzentrum lieferten Studien, die nachwiesen, dass bei Patienten mit zerebraler Achromatopsie dieses Gebiet häufig durch eine Läsion betroffen ist. Außerdem können Verletzungen in dieser Region zu erhöhten Diskriminationsschwellen auf farbige Reize führen (Zihl & von Cramon, 1986).

Cowey und Heywood (1997) griffen das vorangehende Argument auf und stellten fest, dass Läsionen Farbdiskrimination zwar erschweren, sie aber nicht eliminieren. Ein ausführlicher Vergleich zwischen den Arealen V4 bei Makaken und Menschen und die damit verbundenen Schwierigkeiten findet sich bei Merigan (1993). Der Autor berichtet, dass sich sowohl im anatomischen wie funktionellen Bereich Unterschiede finden, die eine Verallgemeinerung vom Makaken auf den Menschen erschweren. Aus anatomischer Sicht nimmt das Areal V4 am Makakengehirn einen wesentlich größeren Bereich in Relation zum Gesamtvolumen ein, als es V4 beim Menschen einnimmt (Abbildung 1.8). Funktional zeigen Affen mit V4-Läsionen geringe oder keine Beeinträchtigung in Aufgaben der Farbunterscheidung, die für einen Menschen unlösbar wären. Das trotzdem immer wieder der Vergleich zwischen dem Farbsehen beim Primaten und beim Menschen gezogen wird liegt daran, dass das trichromatische System beider Spezies hochgradig ähnlich ist (DeValois, 1965).

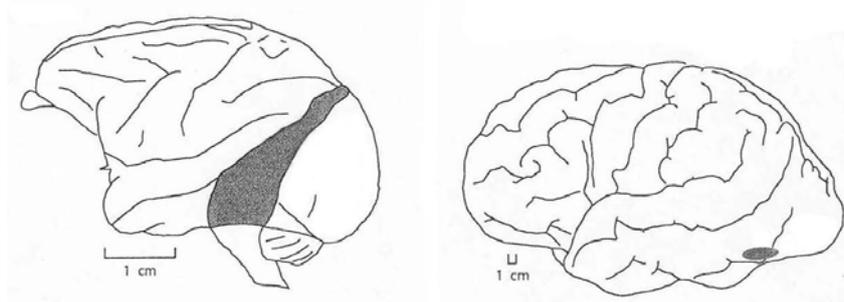


Abbildung 1.8: Vergleich anatomischer Strukturen des Areals V4 (dunkel gekennzeichnet) beim Makaken (links) und beim Menschen (aus Merigan, 1993).

Weitere Gehirnregionen, die außer V4 noch als bedeutsam für Farbwahrnehmung betrachtet werden, sind VP (ventral posterior visuelles Areal), V4v (visuelles Areal 4 ventraler Teil) und V8 (visuelles Areal 8). Ebenfalls diskutiert wird die Region des inferiotemporalen Kortex (IT) wie TE und TEO. Zerstörungen in diesem Bereich haben ein vergleichbares klinisches Bild wie die zerebrale Achromatopsie beim Menschen. Die Entfernung des gesamten Bereiches IT beim Affen verursacht eine Vielzahl anderer dramatischer Effekte auf höhere kortikale Funktionen des Sehens (Heywood, Gaffen & Cowey, 1995; Cowey, Heywood, & Irving-Bell, 2001). Der Prozentsatz von farbselektiven Zellen in diesem Gebiet liegt zwischen 48 % (Gross, Rocha-Miranda & Bender, 1972) und 70 % (Komatsu, Ideura, Kaji & Yamane, 1992).

Experimente mittels Magnetresonanztomographie (MRT) folgern ein menschliches Farbzentrum, das außerhalb V4 existiert. Es wurden Areale, die mehr auf farbige als auf Helligkeitsstimulation antworteten, mit retinotopischen Gebieten verglichen. Aktivierung der Fovea ist nachweisbar in V1, V2, V3/VP und der Region V4v, die als Teil von V4 betrachtet wird. Zusätzlich zeigte sich beständig Aktivität in der Mitte des lateralen Sulcus. Diese Region wird in der Literatur auch als V8 bezeichnet. Ungeachtet ihrer Bezeichnung führt die Benennung eines „Farbzentrum“

dazu, dass andere Regionen, die in Ihrer Funktion äquivalente Aufgaben im Farbwahrnehmungsprozess erfüllen, ignoriert werden. Funktionelle Magnetresonanztomographie zeigte in Farbsortierungsaufgaben eine aktivierte Region, die eher etwas anterior und medial von V4 liegt. Diese Region taucht in der Literatur als V4 α auf und wird mit V4 zum „V4-Komplex“ zusammengefasst. Aktivierungen in dieser Region lassen sich nachweisen bei Aufgaben, die eine Aufrechterhaltung von Farbkonstanz erfordern. Unterschiede zwischen diesen beiden Gebieten zeigen sich auch in der topographischen Organisation. Während V4 noch topographisch gegliedert ist, weist V4 α diese Eigenschaft nicht mehr auf (Bartels & Zeki, 2000).

In Studien zur Farbwahrnehmung werden häufig sogenannte Mondrian-Muster verwendet in Anlehnung an die Werke des Künstlers Pieter Cornelis Mondrian (1872 – 1944). Diese abstrakten Muster haben keine auf Vorerfahrung basierende Bedeutung, die die Versuche beeinträchtigen könnte.

In einer Studie über Objekte und ihre zugehörige Farbe (Zeki & Marini, 1998) zeigte sich im Vergleich zwischen chromatischen und achromatischen Szenen eine erhöhte Aktivierung in den hinteren zwei Dritteln des Gyrus fusiformis. Auffällig war eine Verschiebung der Aktivität in anteriore Bereiche, wenn Objekte in ihrer natürlichen Farbe gezeigt wurden. Farbige Szenen in verfälschter Farbe zeigten vergleichbare Aktivierungsmuster wie die Mondrian-Reize.

Außerdem führen sowohl natürliche als auch unnatürlich kolorierte Szenen zu Erregung in dorsolateralen und ventrolateralen Bereichen des frontalen Kortex. Obendrein fanden sich Hinweise, dass V4 und V4 α aktiv seien beim Betrachten unnatürlicher Szenen, wohingegen natürlich farbige Szenen zu Erregung in V4 α und anterioren Regionen führten, die ebenfalls in Gesichter- und Objekterkennung integriert sind. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Unterscheidung einerseits in Areale,

die der Farbwahrnehmung dienen und andererseits in Areale, bei denen der Funktion nach die Farbe in den Prozess der Objekterkennung integriert sind, möglich ist (Heywood & Kentridge, 2003).

Die meisten Zellen in V4 sind in ihrer spektralen Empfindlichkeit auch nicht enger getunt als es retinale Ganglienzellen oder Zellen im CGL sind. Höchstens eine kleine Subpopulation der Zellen in V4 scheint enger getunt zu sein (Schein & Desimone 1990). Demnach unterscheiden sich die Areale V1, V2 und V4 nicht voneinander.

Studien an Affen haben gezeigt, dass das Entfernen von V4 zwar Farbkonstanz beeinträchtigt, aber zusätzlich eine Vielzahl anderer Funktionen in Mitleidenschaft zieht (Covey & Heywood, 1997). Heywood & Covey (2003) nehmen an, dass ein eigentliches „Farbzentrum“ überhaupt nicht existieren muss.

Eines der Hauptargumente gegen V4 als Farbareal des Affengehirns stammt aus der Läsionsforschung. Läsionen in V4 führen zu geringen Defiziten in der Farbwahrnehmung, Beeinträchtigungen bei der Formwahrnehmung, der Objekterkennung, der Oberflächenerkennung und der Aufmerksamkeitsfokussierung (Gegenfurtner & Kiper, 2003). Demnach ist das menschliche Areal V4 eher eine Schaltstelle zwischen Sehen, Aufmerksamkeit und Kognition, als ein Areal mit nur einer Funktion (Gegenfurtner, 2003).

Obwohl sich die moderne Forschung von der Annahme eines funktionalen Farbzentrums abwendet, erfahren dennoch zwei anatomische Strukturen vermehrt Betrachtung in der Diskussion. Hierzu gehören der fusiforme und der linguale Gyrus des Temporallappens. Als Gyrus fusiformis bezeichnet man die Großhirnwindung im unteren ventralen Bereich des Schläfenlappens und Hinterhauptlappens, die sich zwischen dem Gyrus lingualis und dem Gyrus occipitotemporalis lateralis befindet (Abbildung 1.9). Im occipitalen Teil des Gyrus fusiformis liegt die sogenannte Area V4.

Insbesondere bilaterale Schädigungen in diesen Bereichen führen vermehrt zu Farbwahrnehmungsstörungen (Meadows, 1974; Clarke, Walsh, Schoppig, Assal & Cowey, 1998). In der Nomenklatur der Brodmann-Areale werden die Areale 19, 21, 36, 37 (Abbildung 1.9) als relevant für die Farbwahrnehmung betrachtet (Rüttiger, Braun, Gegenfurtner, Petersen, Schönle, & Sharpe, 1999).

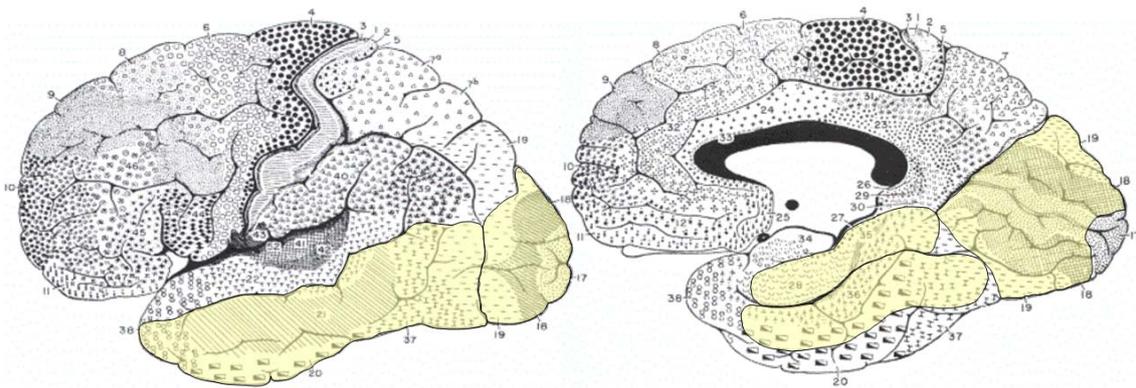


Abbildung 1.9: Für die Farbwahrnehmung als relevant betrachtete Areale und Gyri. Gelb hervorgehoben sind der Gyrus lingualis, der Gyrus fusiformis beziehungsweise die Brodmann-Areale 19, 21, 36 und 37.

Klinisches Bild der Achromatopsie

Als zerebrale Achromatopsie bezeichnet man den selektiven oder mit anderen Defiziten comorbid gekoppelten Ausfall der Farbwahrnehmung. Während bei manchen Störungsbildern wie Rot-Grün-Schwäche (Deutanopien/-anopsien, Protanopien/-anopsien) oder Skotomen (Gesichtsfeldausfälle) Erkrankungen oder Abnormalitäten auf retinaler Ebene vorliegen können, liegt bei der Achromatopsie ein Defekt im Kortex vor.

Erste Erwähnung findet sich bei Samelsohn (1881). Er berichtet über einen Patienten, der nach einem apoplektischen Insult über Sehstörungen im linken Halbfeld

klagt, diese aber nicht näher beschreiben kann. Genauere Untersuchung mittels Perimetrie, auch durch große und kleine Reize, bringt keinen Aufschluss über die Erkrankung. Ebenso bleiben Tests zur Formerkennung mittels Snellenschen Haken ohne Befund. Erst eine Farbperimetrie mit farbigen Rechtecken zeigt, dass der Patient diese als grau wahrnimmt. Die Diagnose lautet „linksseitige homonyme Hemiachromatopsie“. In der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts wurde die homonyme Farbhemianopsie als Vorstufe, Übergang oder als Sonderform der absoluten Hemianopsie angesehen (Zihl & von Cramon, 1986). Homonym bedeutet, dass der Gesichtsfeldausfall den gleichen Bereich beider Augen betrifft. Das heißt, dass die Schädigung jenseits des Chiasma opticums liegt, wo die Fasern des jeweils nasalen Teils des Gesichtsfeldes bereits zur contralateralen Seite des Gehirns gekreuzt sind.

Homonyme Farbausfälle sind sowohl als Hemiachromatopsie oder Quadrantenachromatopsie möglich oder können das ganze Gesichtsfeld betreffend. Achromatopsie tritt sehr häufig gemeinsam mit schlechter Kontrastsensitivität und Prosopagnosie (der Unfähigkeit, Gesichter zu erkennen) auf. Gelegentlich können auch die Wahrnehmung von Oberflächen und Strukturen, bewegten oder unbewegten Objekten und abstrakten Mustern in Mitleidenschaft gezogen sein. Es ist aber ebenso möglich, dass keine anderen Leistungen beeinträchtigt sind. Ebenfalls kann der foveale Bereich beeinträchtigt oder unbeeinträchtigt sein (Abbildung 1.10). Nahezu alle Patienten mit Achromatopsie haben Gesichtsfeldausfälle. Schädigungen im Bereich des fusiformen und der lingualen Gyrus verursachen aufgrund ihrer topografischen Lage häufig auch Läsionen in V1.

Die Ausprägung der Farbwahrnehmungsstörung kann stufenlos erfolgen und reicht von mangelhafter Unterscheidungsfähigkeit oder der Wahrnehmung von ausschließlich Hauptfarben bis zum vollständigen Farbverlust.

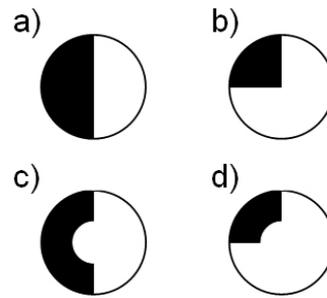


Abbildung 1.10: Arten von Gesichtsfeldausfällen: a)+c) Hemianopsien, b)+d) Quadrantenanopsien, a)+b) mit Beeinträchtigung der Fovea, c)+d) mit Aussparung der Fovea.

Zu den ätiologischen Ursachen zählen Apoplexie, bilaterale Posteriorinfarkte, bilaterale occipitale Tumore, occipitale Blutungen, Schädel-Hirn-Traumata, Schussverletzungen oder Hypoxien (Zihl & von Cramon, 1986). Mollon (2003) ergänzt diese Liste um Erkrankungen wie Glaukome, Diabetes Mellitus, Multiple Sklerose und zerebrale Entzündungen.

Läsionen in den parvozellulären Schichten des CGL verursachen selektive Beeinträchtigungen der Farbwahrnehmung bei Makaken. Läsionen in den Magnozellularen Schichten verursachen diese Funktionsausfälle nicht. Eine frühe Ansicht war, dass zerebrale Achromatopsie schlicht aus der Zerstörung des parvozellulären Pfades resultiert. Diese Ansicht ist obsolet und nicht länger haltbar (Cowey & Heywood 1995). Aktuelle Forschungsergebnisse haben erbracht, dass der Bewegungspfad nicht völlig farbenblind ist (Heywood & Cowey, 2003).

Weiterführende klinische Spezifizierungen finden sich bei Grüsser & Landis (1991). Diese Autoren unterscheiden zwischen anomalen Tri- und Dichromasien, peripherer Achromatopsie, zentraler Achromatopsie, Farb-Agnosie, Farb-Hypoemotionalität, Farb-Anomie und Farb-Aphasie. Diese Bereiche erfahren in der Forschung unterschiedlich intensive Betrachtung.

Auch wenn die Leistung „Farbkonstanz“ als elementare und höhere kortikale Funktion behandelt wird, so ist doch Farbkonstanz nicht einfach mit Achromatopsie gleichzusetzen. Die Konsequenzen von zerebraler Achromatopsie sind schwerwiegender und weitreichender als es nur eine Fehlleistung der Farbkonstanz ist (Rizzo, Nawrot, Blake & Damasio, 1992).

2. Die Farbttestbatterie

Voruntersuchung

Zu unserer Voruntersuchung zählten ein eigens entwickelter Anamnesebogen, Messungen von Sehschärfe, Stereosehen, Farbsehen und Kontrastsehen, ein Händigkeitsfragebogen, der EKN-Fragebogen, zwei Neglect-Tests und eine Gesichtsfeldmessung.

Ein Anamnesebogen erhob statistische Daten bezüglich Geschlecht, Familienstand, Schulbildung, Zeitpunkt der Schädigung, Medikamentierung, bekannte Fehlsichtigkeiten oder Augenerkrankungen, Brillenstärke und - im Fall der Patienten - der Archivierungsort der von uns benötigten Bildgebung (Anhang A). Ein Katalog zum Abhaken erleichterte uns den Überblick über den Stand unserer Untersuchung.

Die Ergebnisse von Sehschärfe, Stereosehen, Farbsehen und Kontrastsehen wurden auf einem Protokollbogen (Anhang B) festgehalten. Zur Messung der Sehschärfe verwendeten wir *Einzeloptotypen nach Landolt* (Abbildung 2.1), um den Nahvisus zu bestimmen. In dieser Variante konnten die Öffnungen unten, oben, links oder rechts sein. Den Versuchspersonen wurden drei Tafeln bei Tageslicht in einem Abstand von 40 cm dargeboten. Das Kriterium war, wie im Manual angegeben, die Mehrzahl pro Zeile richtig zu beantworten. Jede Versuchsperson musste mindestens einen Visus von 0.8 erzielen, um an unserem Experiment partizipieren zu dürfen. Der Visus ist der Kehrwert der in Minuten gemessenen angularen Sehschärfe. Er ist einheitenlos. Man differenziert zwischen dem Visus s.c. (sine correctione = Visus ohne Korrektur) und dem Visus c.c. (cum correctione = Visus mit Korrektur). Korrekturlinsen waren zugelassen und sollten von den Probanden selbst mitgebracht werden.

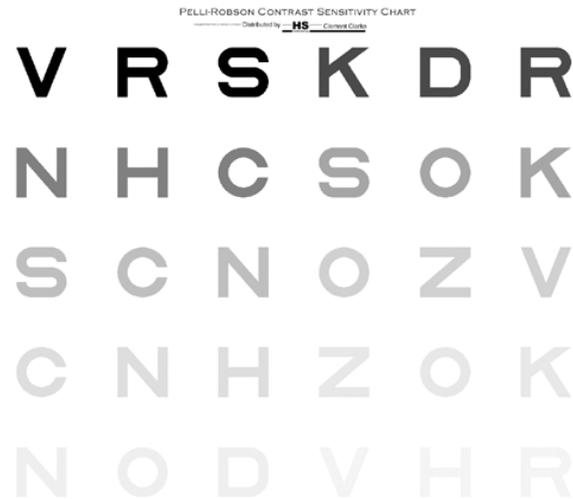


Abbildung 2.2: Ausschnitt aus den Pelli-Robson-Charts.

Für das Stereosehen verwendeten wir den Stereo-Fly Test (Abbildung 2.3). Hierbei wurde dem Probanden eine Brille mit zwei unterschiedlichen Polarisationsfiltern aufgesetzt. Die erste Aufgabe war, die Flügel einer dreidimensionalen Fliege zu greifen. Im Folgenden wurden jeweils vier Kreise gezeigt, von denen jeweils einer hervorstach. Die Zahl der Bogensekunden, die den Unterschied zwischen den beiden Bildern festlegt, wurde in jedem Durchgang reduziert.



Abbildung 2.3: Stereo-Fly-Test mit Polarisationsfilterbrille.

Der EKN-Bogen (Kerkhoff, Schaub & Zihl, 1990), erstellt von der Entwicklungskommission für Neuropsychologie (EKN), ist ein Screening-Verfahren zur Anamnese zerebral bedingter Sehstörungen nach einer neurologischen Erkrankung (Anhang C). Dieser Fragebogen behandelt Änderungen im Sehen bezüglich Veränderungen allgemein, Lesen, Raumorientierung, Helligkeit, Klarheit, Farben und Irritationen.

Das Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) dient der Erfassung von Händigkeit beziehungsweise Handpräferenz (Anhang D). Es erfragt den Gebrauch von Werkzeugen, Besteck, Schreibwerkzeug und weitere Alltäglichkeiten.

Zur Neglect-Prüfung verwendeten wir die Mesulam-Aufgabe (Mesulam, 1985) und das Halbieren dreier Linien. Das Linienhalbieren ist zwar in der Literatur immer wieder angegriffen worden, kostet aber in der Durchführung nur wenige Sekunden und dient als Ergänzung zur wesentlich zuverlässigeren Mesulam-Aufgabe. Hier bekommt der Patient ein vorgegebenes Symbol gezeigt, welches einer durchgestrichenen Sonne ähnelt. Der Patient soll in drei Minuten alle diese Symbole auf einem DIN-A 4-Blatt finden und mit einem roten Filzstift einfach durchstreichen (Abbildung 2.4). Bei motorisch beeinträchtigten Patienten wurde das Blatt mittels eines Klemmbretts fixiert.

Bei der Frage, ob Linienhalbieren oder Durchstreich-Tests geeigneter sind, wird angeführt, dass Störungen der Größenwahrnehmung oder das Teilen von Objekten nicht exklusiv neglectspezifisch sind, sondern auch bei Hemianopsie oder Hemimikropsie auftreten. Möglich sind auch Sonderformen der selektiven Größenwahrnehmungsstörung. So vergrößern Patienten, die nach einer rechtshemisphärischen temporo-occipitalen Läsion an einer linksseitigen Hemimikropsie leiden, links gelegenen Objekte um ca. 20 %, damit sie subjektiv gleich groß mit rechts gelegenen Vergleichsreizen erscheinen (Karnath, 2002). Der Autor

insistiert, dass nur die asymmetrische Störung der räumlichen Verteilung neglectexclusiv ist. Daher werden defizitspezifische Tests wie Durchstreichaufgaben empfohlen. Statistische Bestätigung findet sich in der Validität dieser Tests. Durchstreich-Tests entdecken 95 % aller Neglect-Patienten, das Linienhalbieren hingegen nur 60 %. In unserem Fall haben wir uns nicht exklusiv für eine der Varianten entschieden, sondern verwendeten beide parallel.

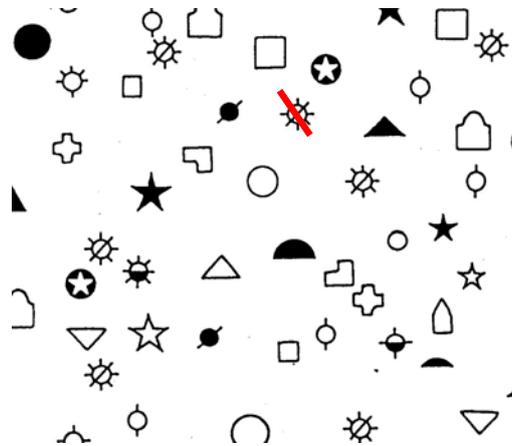


Abbildung 2.4: Ausschnitt aus der Mesulam-Aufgabe; das zu suchende Symbol (durchgestrichene Sonne) wurde hier exemplarisch ein Mal ausgestrichen.

Zur Gesichtsfeldmessung verwendeten wir ein Automatik-Perimeter, das Centerfield 2 der Firma Oculus (Abbildung 2.5). Dieses Gerät hat ein geschlossenes Messsystem, das heißt die geschlossene Bauweise und der lichtgeschützte Einblick ermöglichen eine Untersuchung unabhängig von der Raumhelligkeit. Damit musste die Perimetrie nicht im absoluten Dunkelraum durchgeführt werden.



Abbildung 2.5: Automatik-Perimeter „Centerfield 2“ der Firma Oculus (Quelle: <http://www.oculus.de/>).

Das Auge, das gerade nicht gemessen wurde, wurde mittels einer komfortablen Augenklappe verschlossen, unter deren Wölbung die Versuchsperson das Auge entspannt offen lassen durfte. Die Antworten erfolgten über einen Taster, der in die dominante beziehungsweise nicht beeinträchtigte Hand gegeben wurde. Die genaue Instruktion an die Versuchspersonen findet sich in Anhang E.

Das Prüfpunktraster ist vom Benutzer flexibel programmierbar und konnte deshalb an die besonderen Bedingungen motorisch verlangsamter Patienten angepasst werden. Wir testeten statisch mit weißen Lichtpunkten der Größe III im Bereich bis 30° Exzentrizität. Die Messung dauerte je nach Antwortzeit der Versuchsperson vier bis fünf Minuten pro Auge. Per verstellbarer Kinnstütze war das Gerät an jede Körper- und Kopfgröße optimal anzupassen. Mit der integrierten Kamera konnte die Fixation permanent kontrolliert werden. Während der Untersuchung wurde die Fixation des Probanden über den zu Beginn der Untersuchung gemessenen Schwellenwert im Zentrum immer wieder automatisch überprüft. Außerdem wurde von Zeit zu Zeit durch Motorgeräusche ohne Punktpräsentation die Kooperation des Probanden getestet. Bei unsicherem Befund und bei auffälligen Punkten wurden diese Punkte sofort und selektiv nachuntersucht.

Testbatterie für verschiedene Teilleistungen der Farbwahrnehmung

Die Versuchspersonen wurden instruiert, dass die Reaktionszeit nicht gemessen und beurteilt wurde. Eine ausführliche Instruktion zu jedem der Tests findet sich in Anhang F. Vor jedem Versuch wurde ein Testdurchgang durchgeführt, damit die Probanden sich mit der vom Versuchsleiter gestellten Aufgabe und der Tastatur auseinander setzen konnten. Jeder Probedurchgang hatte eine festgelegte Zahl an Trials. Zuerst machte der Versuchsleiter die Tastenbedienung vor, danach konnten die Versuchspersonen sich selbst damit vertraut machen. Waren nach dem Testdurchgang noch Fragen zu den Aufgaben oder der Tastenbedienung offen, so wurden diese beantwortet.

Für die Antworten der Versuchspersonen war ein separater Nummernblock (Abbildung 2.6) umkodiert worden. Wurde nach den Quadranten gefragt (Detektion, Diskrimination), so dienten die Tasten 1, 3, 7 und 9 als Richtungsangabe. Bei Farbantworten (Kategorisierung, Konstanz) verwendeten wir die Taste 6 als „rot“, 8 als „gelb“, 4 als „grün“ und 2 als „blau“. Waren Zwischenantworten möglich (Kategorisierung), so diente die 7 der Mischfarbe „grünliches gelb“, die 9 bedeutete „gelbliches rot“, die 1 „grünliches blau“ und die 3 „rötliches blau“.

Die gesunden Versuchspersonen bedienten den Tastenblock selbst. Patienten gaben die Antwort verbal oder zeigten bei aphasischen Beeinträchtigungen je nach Aufgabe auf das Ziel. Bei den Patienten startete der Versuchsleiter jeweils den neuen Durchgang. Dadurch, dass das Programm nicht von selbst durchlief, konnte theoretisch nach jedem Trial eine Pause gemacht werden, wenn die Versuchsperson diese wünschte. Die Space-Taste diente der Eingabebestätigung und dem Starten des neuen Trials, wurde aber nur von den gesunden Probanden selbst bedient.

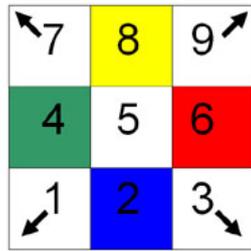


Abbildung 2.6: Der verwendete Nummernblock, schematisch mit Tastenkodierung links und im realen Untersuchungsaufbau rechts.

Detektion – Entdecken farbiger Reize

Dieser Test überprüft, ob die Versuchsperson in allen vier Quadranten des Gesichtsfeldes gleichermaßen farbige Reize entdecken kann. Der Hintergrund des Bildschirms wird in einem Grau mittlerer Helligkeit präsentiert. In der Mitte zeigt sich ein weißer Fixationspunkt in Form eines kleinen Quadrates (Abbildung 2.7). Die Präsentation des farbigen Zielreizes geschah mit einer Exzentrizität von 10° Schwinkel vom Zentrum. Es wurden 96 Farbpunkte (acht Farbtöne * drei Sättigungen * vier Quadranten) aus dem DKL-Farbraum gewählt, die mit abnehmender Sättigung und innerhalb jeder Sättigung in randomisierter Reihenfolge dargeboten wurden. Die Berücksichtigung aller vier Quadranten war hierbei gleich verteilt, das heißt alle Reize wurden in allen Quadranten jeweils einmal dargeboten. Jeder Reiz wurde 500 ms präsentiert. Die Darbietungszeit war so kurz gewählt, damit die Versuchsperson nicht genug Zeit für vier Sakkaden zu den jeweils potentiellen Erscheinungsorten machen konnte.



Abbildung 2.7: Screenshots der Aufgabe „Detektion“, von a) nach c) abnehmende Sättigung des Reizes.

Die Farbpunkte wurden aus der isoluminanten Ebene mittlerer Helligkeit gewählt. Pro Sättigung wurden acht Farben präsentiert (Abbildung 2.8), wobei jeder Farbpunkt einmal pro Quadrant erschien.

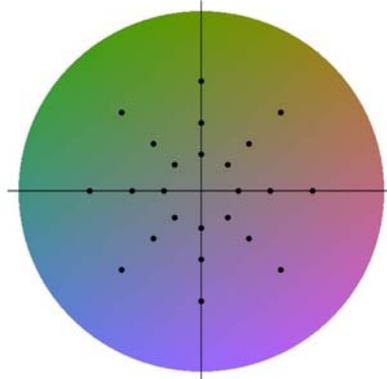


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der gewählten Farbtöne und –sättigungen. Diese wurden in jedem Quadranten präsentiert.

Die Aufgabe des Probanden war während des Durchgangs auf den Fixationspunkt zu blicken. Es wurde beurteilt, ob die erscheinenden farbigen Punkte oben rechts, oben links oder unten links beziehungsweise unten rechts waren. Jede Versuchsperson absolvierte vor der Datenerhebung eine verkürzte Trainingsrunde, bei der sechs Übungsreize unter Testbedingungen präsentiert wurden. Die Durchführungsdauer variierte je nach Belastbarkeit der Versuchsperson. Bei gesunden

Probanden konnte dies Experiment in vier Minuten durchgeführt werden. Bei Patienten dauerte die Durchführung zwischen fünf und zehn Minuten.

Die für weitere Untersuchung beibehaltenen Parameter wurden in einer ersten Messung an gesunden Probanden ($n = 5$) erhoben. Die Versuchspersonen (drei Frauen, zwei Männer) waren psychisch und neurologisch gesund, zwischen 26 und 37 Jahren alt und mit akademischem Hintergrund. Die Parameter wurden so gewählt, dass die Versuchspersonen im Vorversuch bei höchster Sättigung 99 % korrekte Antworten, bei mittlerer Sättigung 95 % und bei niedrigster Sättigung 50 % erreichten (Abbildung 2.9). Daraus ergaben sich für die Detektions-Stimuli 50 %, 20 % und 10 % Kontrast zwischen Stimulus und Hintergrund. Die Leistung war über alle vier Quadranten gleich.

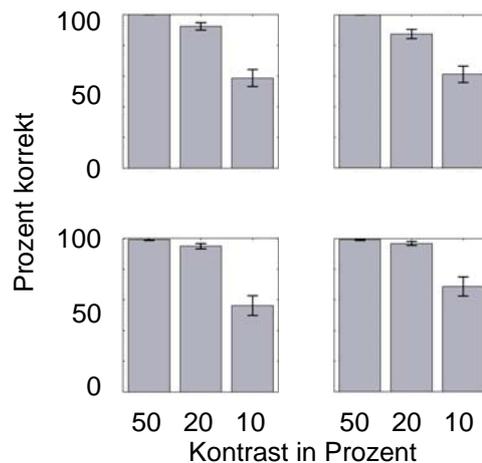


Abbildung 2.9: Ergebnisse für gesunde Versuchspersonen in den vier Quadranten des Gesichtsfeldes. Für die drei Kontraste 50 %, 20 % und 10 % erreichten die Versuchspersonen 99 %, 95 % und 50 % korrekte Antworten.

Diskrimination – Unterscheiden farbiger Reize

Der Diskriminationstest dient der Unterscheidung farbiger Reize in allen vier Quadranten des Sehfeldes. Auch hier erscheint der Hintergrund in mittlerem grau. In der Mitte befindet sich ein Fixationspunkt. Um diesen Punkt werden vier gleich große

Quadrate für 500 ms dargeboten. Drei der vier Quadrate zeigen die Testfarben aus der isoluminanten Ebene des DKL-Raumes. Das vierte Quadrat zeigt die Vergleichsfarbe, die erkannt werden soll (Abbildung 2.10).

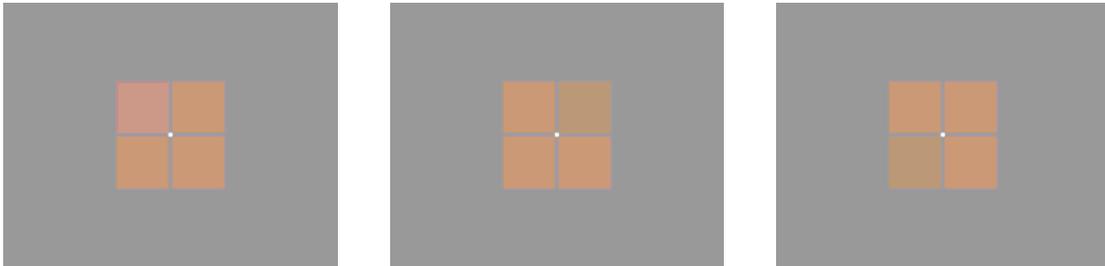


Abbildung 2.10: Screenshots der Aufgabe „Diskrimination“, drei verschiedene Amplituden.

Die Testfarben werden aus acht Farben der DKL-Ebene gewählt. Möglich sind hier Rot, Grün, Gelb, Blau und dazwischenliegende Farbtöne (Abbildung 2.11). Jede abweichende Farbe wird vier Mal in Farbton und –sättigung variiert und in jeweils drei Amplituden dargeboten. In der ersten Amplitude zeigen die Vergleichsfarben noch den größten Unterschied zu den Testfarben. Die Schwierigkeit nimmt mit jeder weiteren Amplitude zu.

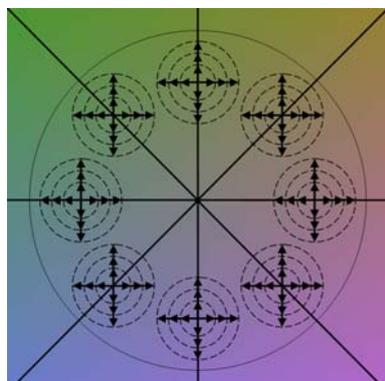


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung der gewählten acht Testfarben und der darum liegenden drei Amplituden, die die Vergleichsfarbe in Farbton und –sättigung variieren. Drei Quadrate zeigen die Testfarbe, eins die Vergleichsfarbe.

Es werden acht Testfarben und 96 Vergleichsfarben präsentiert, also pro Testfarbe zwölf Vergleichsfarben. Innerhalb jeder Amplitude werden die Farben randomisiert dargeboten. Konkret heißt das, dass eine zufällig gewählte Testfarbe zuerst eine zufällig gewählte Vergleichsfarbe mit dem größten farblichen Unterschied erhält. Sind von allen Testfarben die Vergleichsfarben mit dem größten Unterschied präsentiert worden, werden die Vergleichsfarben entsprechend aus dem mittleren Unterschiedsbereich gezeigt. Sind auch alle diese in zufälliger Reihenfolge dargeboten worden, werden die Vergleichsfarben entsprechend aus dem Bereich des kleinsten Unterschiedes präsentiert.

Die Aufgabe der Probanden war es zu beurteilen, welches der vier Quadrate sich von den anderen unterschied. Der Unterschied konnte entweder im Farbton oder in der Sättigung bestehen. Dabei sollte wieder nur auf den Fixationspunkt gesehen werden und die Reize in der Peripherie beurteilt werden. Auch absolvierte jede Versuchsperson vor der Datenerhebung eine verkürzte Trainingsrunde, bei der sechs Übungsreize unter Testbedingungen präsentiert wurden. Die Durchführungsdauer der ganzen Aufgabe variierte je nach Belastbarkeit der Versuchsperson. Bei gesunden Probanden konnte dieses Experiment in fünf Minuten durchgeführt werden. Bei Patienten dauerte die Durchführung zwischen zwölf und fünfzehn Minuten.

Ebenfalls wurden die Parameter an der gleichen Versuchspersonengruppe wie in der Detektion ($n = 5$) überprüft. Die Parameter wurden ebenfalls so gewählt, dass die Versuchspersonen im Vorversuch bei höchster Sättigung 99 % korrekte Antworten, bei mittlerer Sättigung 95 % und bei niedrigster Sättigung 50 % erreichten. Daraus ergaben sich für die Diskriminations-Stimuli 30 %, 20 % und 10 % Kontrast zwischen Vergleichsfarbe und Testfarbe. Die Leistung war auch hier über alle vier Quadranten gleich.

Kategorisierung – Benennen farbiger Reize

Dieser Test überprüfte, welche Farbnamen den verschiedenen Stimuli zugeordnet wurden. Hierzu wird ein 10°-Sehwinkel durchmessender, farbiger Kreis in der Mitte des Monitors für 1000 ms gezeigt. Der Hintergrund des Bildschirms erhielt ein zu den chromatischen Stimuli isoluminantes Grau (Abbildung 2.12). Die Stimuli hatten einen Kontrast von 50 %, 20 % und 10 % äquivalent zu der Detektionsaufgabe.

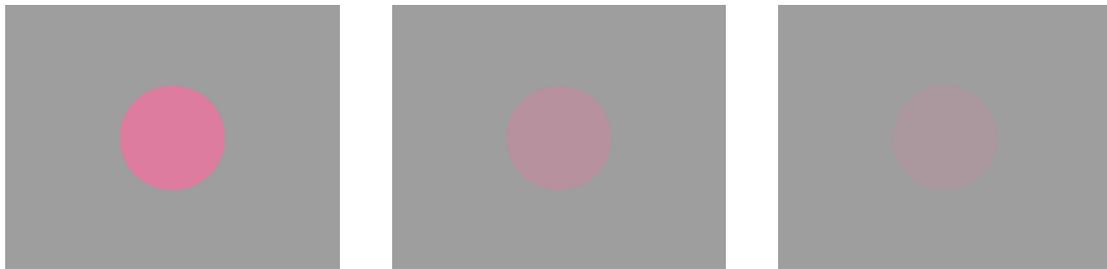


Abbildung 2.12 Screenshots der Aufgabe „Kategorisierung“, drei verschiedene Sättigungsstufen.

Es wurden pro Sättigung 16 Farben aus der DKL-Ebene gewählt, die innerhalb jeder Sättigungsstufe randomisiert wurden (Abbildung 2.13). Insgesamt wurden 48 Farben beurteilt. Mit abnehmender Sättigung wirkten die Farben immer blasser und wurden schwerer zu beurteilen.

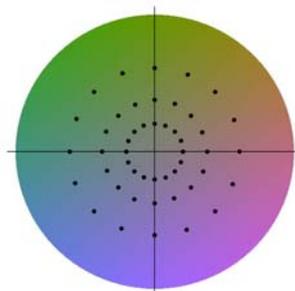


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung der gewählten 16 Farben in drei Sättigungsstufen.

Den Versuchspersonen standen als Antwort die Hauptkategorien „Rot“, „Gelb“, „Grün“ und „Blau“ zur Verfügung. Dazwischenliegende Farben durften mit Antworten „zwischen Rot und Gelb“, „zwischen Gelb und Grün“, „zwischen Grün und Blau“ und „zwischen Blau und Rot“ deklariert werden. Es war offensichtlich, dass Versuchspersonen, die „Orange“ antworteten, die Kategorie „zwischen Rot und Gelb“ meinten. Antworten wie „Lila“, „Flieder“, „Violett“ und „Purpur“ wurden jedoch nicht differenziert aufgeschlüsselt und alle mit dem Label „zwischen Blau und Rot“ belegt. Patienten antworteten verbal, gesunde Versuchspersonen direkt per Tastatur. Das Programm protokollierte die Antworten ohne sie zu beurteilen. Die Abfrage war rein deskriptiv und diente dazu, das subjektive Beurteilen der Versuchspersonen zu erfassen. Da die Versuchspersonen meist schon in der vorangehenden Aufgabe die Farben kennen gelernt hatten und die Aufgabe kaum Raum für Missverständnisse bot, wurde die Übungsphase hier nur so lang durchgeführt, bis vier Farben aus orthogonalen Richtungen der DKL-Ebene präsentiert wurden. Die Durchführung der Kategorisierungsaufgabe dauerte mit Gesunden etwa drei Minuten, mit Patienten vier bis acht Minuten.

Farbkonstanz – Wahrnehmung farbiger Reize in unterschiedlichen Umgebungen

Auf dem Bildschirm wurden acht gleichgroße Quadrate in zwei Reihen dargeboten. Der Hintergrund der linken vier Quadrate unterschieden sich farblich von dem Hintergrund der rechten vier (Abbildung 2.14). In dieser Versuchsanordnung waren die Quadrate in zwei Bedingungen gruppiert. Die linken vier Quadrate stellten die Farbvorgabe dar, die rechten vier Quadrate konnten in ihrer Farbe verändert werden.

Zwei der Quadrate aus jeder Gruppe blinkten auf. Das auf der rechten Seite sollte dem auf der linken Seite angepasst werden.

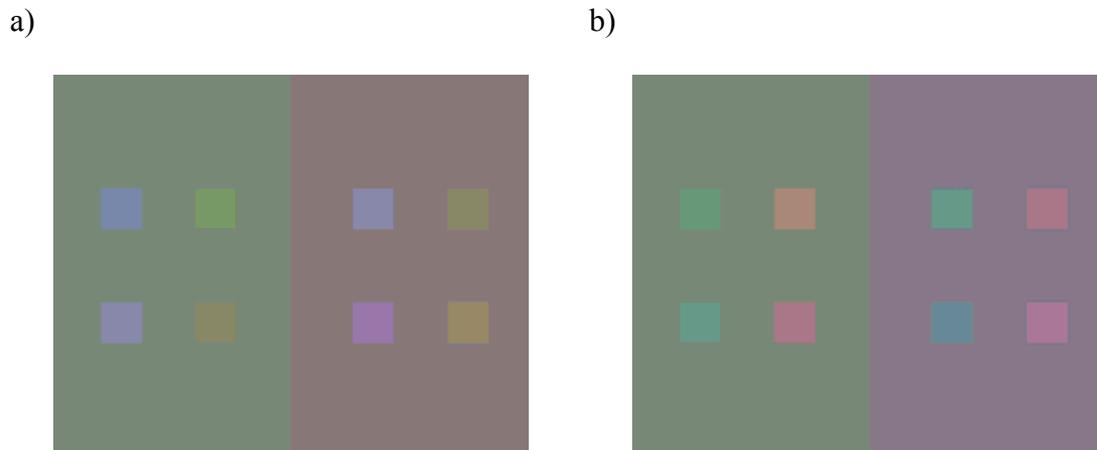


Abbildung 2.14: Farbreizbeispiel für den Konstanztest. In Abbildung a) wurde die Antwort in Rot/Grün-Richtung justiert. Abbildung b) zeigt die Gelb/Blau-Variante dieser Aufgabe.

Diese Illusion lässt im Beispiel Abbildung 2.14 a) die oberen zwei Quadrate links und rechts jeweils blau und grün aussehen. Die unteren erscheinen hingegen lila und orange. Physikalisch korrekt entsprechen sich jedoch die beiden Quadrate unten links und oben rechts. Durch die unterschiedlichen Hintergründe wirkt die ganze Szene so, als seien die Quadrate links eher grünlich beleuchtet und die Quadrate rechts eher rötlich. Hierbei wird ausgenutzt, dass der Mensch Beleuchtung und Reflektanz nicht trennen kann. Folglich werden die Farben der Quadrate nicht absolut beurteilt, sondern in Relation zu ihrem jeweiligen Hintergrund. Die Abbildung 2.15 verdeutlicht die Anordnung der chromatischen Reize für das Beispiel Abbildung 2.14 a) in der DKL-Ebene. Die Reize der rechten Seite sind mit großen Kreisen gekennzeichnet. Sie werden dargestellt vor einem rötlichen Hintergrund (kleiner Kreis). Die Stimuli links werden vor einem grünlichen Hintergrund gezeigt (kleines Kreuz) und sind um diese Farbe gruppiert (große Kreuze). Wenn Menschen farbige Objekte beurteilen, dann tun sie das

in Relation zur Beleuchtung der Szene. In diesem Fall können wir dem Hintergrund entnehmen, dass die Szene nicht neutral beleuchtet wird, sonst wäre der Hintergrund grau. Stattdessen beleuchten eine grünliche und eine rötliche Lichtquelle die beiden Seiten und somit auch die auf ihnen befindlichen Objekte. Wenn wir Objekte in ihrer Relation zum Hintergrund beurteilen, so müssen uns die oberen Objekte als gleich erscheinen, denn sie haben den gleichen Abstand zum Hintergrund. Physikalisch sind aber die beiden Farben unten links und oben rechts identisch, was nur bei gleichem Hintergrund, zum Beispiel einem neutralen Grau sichtbar wäre.

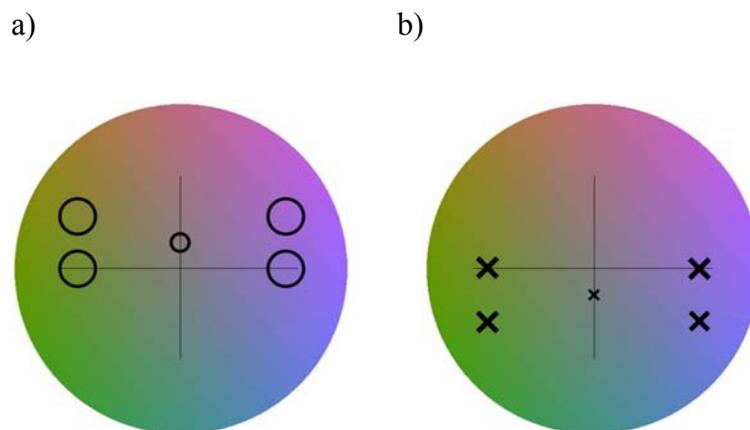


Abbildung 2.15: Anordnung der Reize für das Beispiel Abbildung 2.14 a) in schematischer Darstellung in der DKL-Ebene. a) rötlicher Hintergrund; b) grünlicher Hintergrund.

Die zu verändernden Quadrate waren zu Beginn auf die Farbe eingestellt, die der Täuschung diene. Nach dem Einstellen behielten die Quadrate die Farben der Versuchsperson bei. Zum Beispiel wurde das erste einzustellende Quadrat auf eine neue, in die Anordnung unpassende Farbe gesetzt. Zur Verdeutlichung wurden die Farben der acht Quadrate in Abbildung 2.16 alle in der gleichen Darstellung gezeigt. Hierzu wurde die „illusionsunterstützende“ Farbe auf der Rot-Grün-Achse verschoben (Abbildung 2.16). Das die einzustellende Farbe repräsentierende Kreuz (hier grau

dargestellt) wurde um einen zufälligen Betrag in Richtung „Grün“ verschoben, ohne den DKL-Raum zu verlassen.

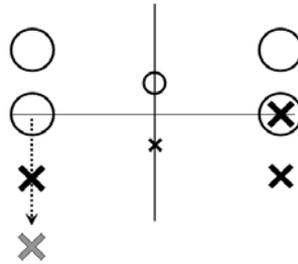


Abbildung 2.16: Das einzustellende Quadrat wird in der Farbe verändert, hier in Richtung Grün.

Die Aufgabe der Versuchsperson ist es, durch bedienen der „Rot“- und „Grün“-Tasten das Farbarrangement wieder herzustellen und diese Farbe ihrer entsprechenden anzugleichen. Mit den Tasten kann dem rechten Quadrat die gewünschte Farben hinzugefügt oder aber auch mit der gegenüberliegenden entfernt werden. Dabei kann die Taste wiederholt gedrückt oder gedrückt gehalten werden. Die Farbänderung setzt dann nach einer Sekunde kontinuierlich ein. Erreicht die Versuchsperson den Rand des DKL-Raumes, so ertönt ein Signalton und der Änderungsprozess stoppt. Die Farbanpassung ist dann nur noch in der anderen Richtung möglich.

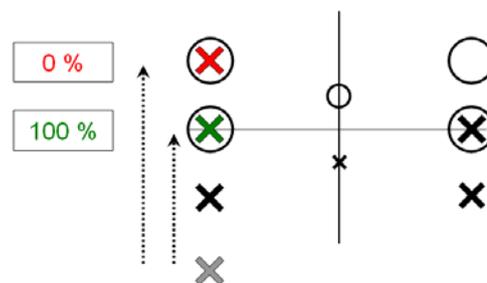


Abbildung 2.17: Beispiele für erreichbare Farbkonstanz-Indices.

Die Versuchsperson hatte die Möglichkeit, die Farbe (in Abbildung 2.17 das graue Kreuz) zurück auf den Punkt zu führen, von dem sie gemäß dem Zufallsprinzip weggesetzt wurde (grünes Kreuz). Das würde bedeuten, dass die Farbe in Relation zu ihrem Hintergrund beurteilt wurde und erhielt als Score einen Farbkonstant-Index von 100 %. Stellte die Versuchsperson die Farbe physikalisch exakt auf die Farbe ein, mit der sie verglichen werden sollte (rotes Kreuz), so wurden die Farben vom Probanden unabhängig vom Hintergrund beurteilt und die Farbkonstanz-Leistung lag damit bei 0 %. Es waren alle Index-Scores darüber hinaus und dazwischen auf einem Kontinuum möglich.

In der Übungsphase stellten die Versuchspersonen zwei Quadrate aus der Grün-Rot-Bedingung ein, um Erfahrungen im Umgang mit der Tastatur und den sich ändernden Reizen zu bekommen. Auch hier war die Zeit nicht begrenzt.

In einem zweiten Durchgang war die gleiche Aufgabe für Quadrate vor einem blau-gelben Hintergrund zu bewältigen, dargestellt in Abbildung 2.14 b). Anschließend wurden die Messungen für Rot-Grün und Blau-Gelb seitenverkehrt wiederholt, damit statt acht im Ganzen 16 Datenpunkte zu Auswertung vorlagen.

Bei gesunden Probanden dauerte dieses Experiment circa fünf Minuten. Patienten benötigten zwischen zehn und dreißig Minuten. Dieses Experiment war nur von motorisch unbeeinträchtigten Patienten durchzuführen. War die dominante Hand hemiplegisch, so durfte auch die nichtdominante Hand verwendet werden. Davon, dass der Versuchsleiter die Tasten stellvertretend für die Patienten bedient, wurde gänzlich Abstand genommen. Die Informationsverluste wären bei dieser Art der Einstellung zu groß.

Vorversuch: Zweidimensionale Einstellung möglich.

Zu Beginn dieses Forschungsprojektes, als die Stimuli erstellt wurden, wurde diese Aufgabe mit einer zweidimensionalen Antworteinstellung geplant. Das heißt, dass die nach dem Zufallsprinzip veränderte Farbe nicht nur im Rot-Grün-Bereich versetzt wurde, sondern noch zusätzlich in Blau-Gelb-Richtung. Die Versuchspersonen mussten entsprechend auch alle vier Tasten zur Einstellung benutzen. Da der Hintergrund aber entweder Grün-Rot oder Blau-Gelb geteilt war, wurde bei jedem Durchgang nur die gefragte Farbdimension ausgewertet. Es kam aber vor, dass in den rot-grünen Trials, bei denen auch nur dieser Konstanzindex gemessen wurde, die Abweichung in blau-gelber Richtung so groß war, dass sie die rot-grüne Abweichung um ein vielfaches überschritt. Folglich war keine zuverlässige Aussage über eine gute Rot-Grün-Leistung zu treffen (selbst wenn auf dieser Dimension tatsächlich ein dicht an der farbkonstanten Antwort liegender Wert erzielt wurde), wenn der Fehler in blau-gelb zu groß war. In anderen Worten war die zweidimensionale Einstellung bereits für unbeeinträchtigte, gesunde Probanden zu schwer und wurde deshalb verworfen.

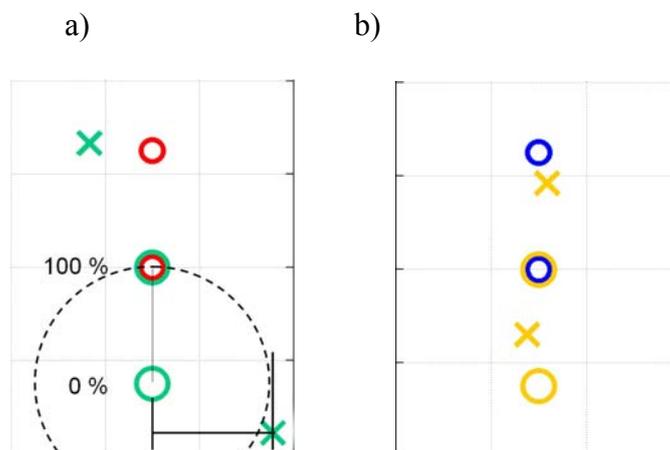


Abbildung 2.18: Beispiele aus der zweidimensionalen Konstanzaufgabe. a) unbrauchbare Einstellung, b) verwendbare Einstellung.

Die Abbildung 2.18 veranschaulicht dies mit einem Beispiel. Unter a) sind die Vergleichsfarben zu sehen (grüne Kreise) und die Ziele (rote Kreise), bei denen die Versuchsperson 100 % Farbkonstanz erreichen würde. Die grünen Kreuze zeigen die tatsächliche Einstellung der Versuchsperson. Die Vertikale stellt die zu beurteilende Dimension, also die Rot-Grün-Achse dar. Bedauerlicherweise weichen die eingestellten Farben auf der horizontalen Blau-Gelb-Achse zu stark ab. Wann immer also Abweichungen in der nicht zu messenden Dimension größer waren als die Differenz zwischen 0 % und 100 % (gestrichelter Kreis) in der gemessenen Richtung, wurde der Datensatz verworfen.

Unter b) findet sich eine brauchbare Einstellung der Versuchsperson in einer Blau-Gelb-Aufgabe. Die Vertikale zeigt hier die Blau-Gelb-Achse. Horizontale Abweichungen sind gering, das heißt liegen unterhalb der Distanz zwischen 0 % und 100 % Farbkonstanz.

Transparenz

Eine besondere Form der Farbkonstanzleistung ist die Wahrnehmung von Transparenz. Ein farbiger Filter verändert die Wahrnehmung einer Szene an einer Stelle, lässt aber die dahinterliegenden Farben durchscheinen. Die Veränderung, die der Filter bewirkt, kann an seinen Rändern registriert werden. Hier zeigt sich durch direkten Vergleich die dahinterliegende Farbe und der veränderte Eindruck, den der Filter erzeugt. Dadurch kann die Durchlässigkeit beziehungsweise die Dichte des Filters errechnet werden, in anderen Worten, wie stark seine Änderung auf die verdeckten Objekte wirkt.

Ein transparenter Filter lässt sich physikalisch-real überzeugender gestalten als ein virtueller. Damit ein programmierter Filter, der am Monitor dargeboten wird, dem

realen an Überzeugungskraft gleich kommt, müssen die physikalischen Gesetze adaptiert und eingehalten werden.

Es muss unterschieden werden zwischen physikalischer Lichtdurchlässigkeit und *perzeptueller Transparenz*. Die Definition von perzeptueller Transparenz ist der Wahrnehmungseindruck, der durch die Übereinanderlagerung zweier sich in verschiedenen Tiefenebenen befindlicher Objekte vermittelt wird, wobei eines durch das andere hindurch gesehen wird. Perzeptuelle Transparenz ist eine Qualität der subjektiven visuellen Wahrnehmung und keine physikalische Bezeichnung. Wir nehmen ein Objekt nur dann als durchsichtig wahr, wenn wir das Objekt selbst sehen können. Elemente wie Luft oder Glas, wenn hier Reflektionen oder Verunreinigungen außer Acht gelassen werden, sind im physikalischen Sinn lichtdurchlässig, erfüllen in unserem Alltag aber nicht den subjektiven Eindruck von einem Objekt, das sich vor unseren Augen befindet, aber durchsichtig ist (Metelli, 1987). Es bleibt die Frage, wie es zu perzeptueller Transparenz kommt. Die Beschaffenheit von Licht, das von einer Oberfläche reflektiert wurde und durch einen optischen Filter auf die Retina trifft, hängt von Beleuchtung, Oberfläche und lichtdurchlässiger Schicht ab. Das aus diesen drei Faktoren resultierende Licht lässt sich aber durch die Eigenschaften der Rezeptoren nicht neuronal kodieren. Der Mechanismus der Farbwahrnehmung zeigt aber, dass das visuelle System dennoch fähig ist, eine solche dreidimensionale Szeneninterpretation zu liefern. Man nimmt an, dass das visuelle System hier einer inneren erlernten Logik folgt und in heuristischer Weise globale Stimulusstrukturen als Hinweis auf Oberflächeneigenschaften nutzt. Dazu muss die Farbe in ihre Komponenten und räumlich in Schichten zerlegt werden, was als laminare Segmentierung bezeichnet wird (Mausfeld, 1998).

Bei der Analyse von perzeptueller Transparenz gilt es, zwei spezifische Reizarten zu betrachten, nämlich Episkotister (vergleiche Metelli, 1970, 1974a, 1974b, 1985) und optische Filter. Ein Episkotister nach Metelli ist eine rotierende Scheibe, die sektorförmige Aussparungen besitzt, hinter denen der Untergrund sichtbar wird. Metelli verwendete für seine Versuche eine achromatische Reizeanordnung. Bei Rotation ergibt sich durch additive Mischung ein Sinneseindruck, der die chromatische oder achromatische Farbe der drehende Scheibe und des Hintergrundes vereint. Der optische Filter, zum Beispiel eine getönte Glasscheibe oder ein Filter, zeichnet sich durch eine vom Wellenlängenbereich abhängige Transmission aus. Abgesehen von seiner Eigenreflektanz wirkt er auf Wellenlängen subtraktiv. Licht wird beim Durchgang dieses Filters selektiv in spezifischen Frequenzbereichen abgeschwächt.

Bedingungen zur Transparenzwahrnehmung

Es gibt verschiedene geometrische- und Helligkeitsbedingungen, die notwendig sind, um Transparenzwahrnehmung zu gewährleisten. Üblicherweise wird eine Szene in (mindestens) zwei sich gegenseitig überlappende Flächen aufgeteilt, die räumlich in der Tiefe angeordnet sind. Die Abbildung 2.19 zeigt Beispiele für Helligkeitsverhältnisse zur Erzeugung eines transparenten Eindrucks.

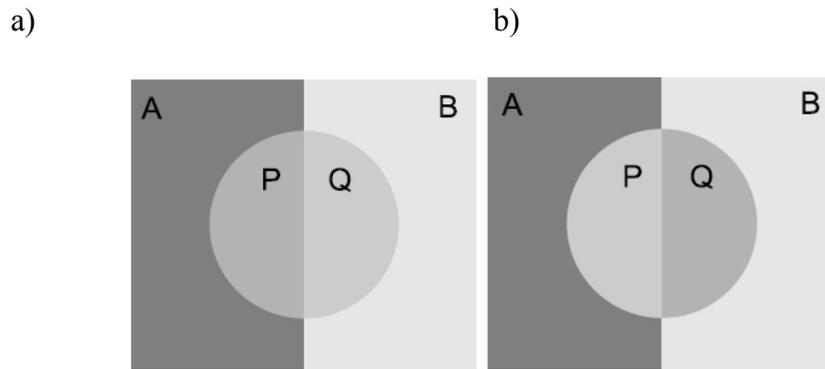


Abbildung 2.19: Erforderliche Helligkeitsverhältnisse (a) und Verletzungen dieser (b) zur Erzeugung eines transparenten Eindrucks.

Die Helligkeitsverhältnisse müssen zwei Bedingungen genügen. Erstens muss P - Q das gleiche Vorzeichen haben wie A - B . Diese Bedingung ist in Abbildung 2.19 b) verletzt, wodurch der transparente Eindruck verloren geht. Zweitens darf der absolute Wert $|P-Q|$ niemals den absoluten Wert $|A-B|$ überschreiten, da selbst bei absoluter Durchlässigkeit des Filters niemals ein Eindruck auftreten kann, der im Erscheinungsbild kräftiger ist als die zuunterst liegende Fläche (Singh & Anderson, 2002).

Zusätzlich zur Helligkeitsanordnung gibt es geometrische Bedingungen, die die Wahrnehmung eines transparenten Filters erschweren oder erleichtern können. Die Abbildung 2.20 zeigt Beispiele und Verletzungen figuraler Konditionen nach Metelli (1974a, 1974b).

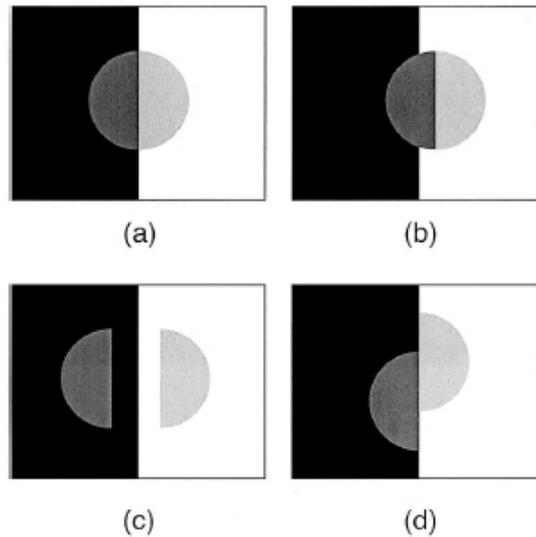


Abbildung 2.20: Figurale Bedingungen für Transparenz (a) und Verletzungen dieser (b, c, d) (nach Metelli, 1974a, 1974b).

In Abbildung 2.20 a) sieht man eine optimale geometrische Anordnung zur Erzeugung eines transparenten Eindruckes. Bei b) springt die Kontur des zugrundeliegenden Musters im transparenten Filter nach rechts und zerstört die Glaubwürdigkeit, dass der Beobachter durch den Filter hindurch sehen kann. In c) ist zu sehen, dass Flächen ohne minimale Struktur, die durch den Filter sichtbar ist, die Glaubwürdigkeit der Transparenz reduziert. In diesem Beispiel könnte es sich auch um zwei hellere, undurchsichtige Halbkreise handeln. Also ist zu folgern, dass die Erscheinung eines transparenten Filters nur auf einem strukturierten Untergrund erzeugt werden kann. Das Beispiel d) erfüllt zwar alle Bedingungen, weist aber ein zufälliges Zusammenfallen zweier geometrischer Strukturen des Filters und des Hintergrundes auf, was den perzeptuellen Eindruck unvorteilhaft abschwächt. Dies wird noch deutlicher in Abbildung 2.21.

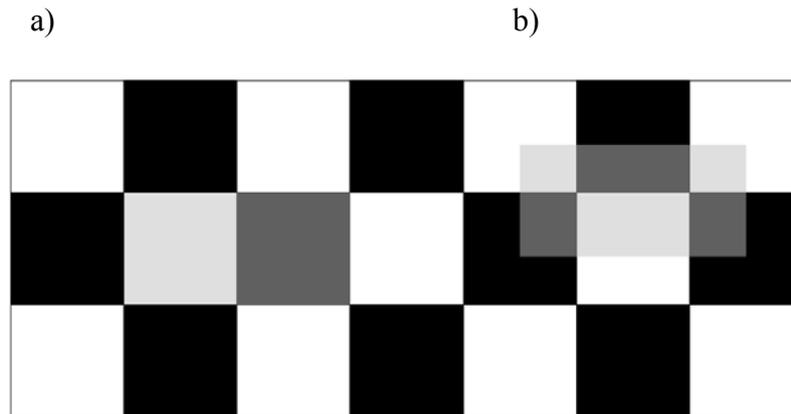


Abbildung 2.21: Beispiele für schlechte (a) und gute (b) geometrische Anordnungen von Filter und Hintergrund (nach Singh & Anderson, 2002).

Eine wichtige Rolle spielt hier das Prinzip, dass Kanten der unterschiedlichen Flächen nicht aufeinander fallen sollten. Das Beispiel a) in Abbildung 2.21 ist physikalisch identisch mit b). Aber erst, wenn die Konturen des Filters nicht auf denen der schachbrettartigen Fläche zu liegen kommen, wirkt die Erscheinung der Transparenz überzeugend. Um den Eindruck eines darüber liegenden Filters noch zu verstärken, wurde der Filter in unserer Versuchsanordnung während der Darbietung bewegt.

Die Durchlässigkeit des Filters wird ausgedrückt durch den Wert Alpha (α), der unterschiedlich verwendet wird, je nachdem ob man ein Episkotister-Modell oder einen optischen Filter verwendet. Im Episkotister beschreibt der Wert α den Winkel, wie groß die Aussparung der drehenden Scheibe ist. Beim optischen Filter benennt der Wert α die Undurchlässigkeit des Filters (*Opaqueness*). Wenn ein Filter ein $\alpha = 0$ hat, dann ist er völlig durchlässig. Hat ein Filter hingegen ein $\alpha = 1$ ist er völlig blickdicht, beschreibt also ein undurchsichtiges Objekt vor einem anderen.

Die Transparenzaufgabe

Wir entwickelten eine Transparenzaufgabe, die der Messung von Farbkonstanz dient. Eine Stelle in der Versuchsanordnung unterliegt besonderen Beleuchtungsbedingungen beziehungsweise wird in ihrer Erscheinung durch einen Filter verändert. Die Leistung der Versuchsperson ist, die farbliche Veränderung zu erkennen und die darunter liegenden Farben zu identifizieren.

Die Aufgabe an die Versuchspersonen lautet: „Bitte beurteilen Sie, welche Farbe das Quadrat hinter dem Filter hat. Das heißt, überlegen Sie, wie die Farbe aussähe, wenn der Filter nicht da wäre und entscheiden Sie sich für eine der Antworten rechts.“ Ausführliche Instruktionen sind in Anhang G zu finden. Die Versuchspersonen wurden gebeten, die Aufgaben ruhig und sorgfältig zu bearbeiten. Es wurde ihnen mitgeteilt, dass die Reaktionszeit nicht wichtig war und nicht gemessen wurde.

Die Antworten gaben gesunde Probanden selbst, indem sie eines der sechs Quadrate durch Tastendruck im Nummernblock der Tastatur auswählten (Abbildung 2.6). Hierbei bedeuteten die Tasten 7 „oben links“, 4 „Mitte links“, 1 „unten links“ und die Tasten 9 „oben rechts“, 6 „Mitte rechts“, 3 „unten rechts“. Die Versuchspersonen konnten sich so häufig und so lange umentscheiden, bis ihre entgeltliche Wahl getroffen war und dann per Space-Taste den neuen Trial starten. Dadurch wurden Fehlentscheidungen und ein unbeabsichtigtes falsches Drücken einer Taste minimiert. Im Versuch mit Patienten wurden die Antworten immer durch den Versuchsleiter protokolliert und die zum Teil motorisch beeinträchtigten Patienten von der Zusatzbelastung der Tastenbedienung entbunden. Wenn dem Versuchsleiter die entgeltliche Wahl mitgeteilt wurde, präsentierte dieser den neuen Versuchsdurchgang.

Dies sollte unerwünschte Eile oder sorgloses Antworten zum Zweck schneller fertig zu werden, vermeiden.

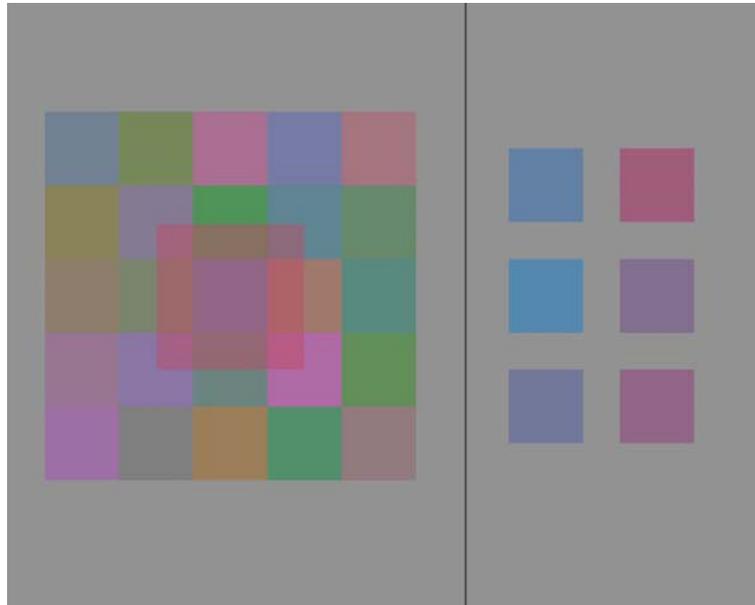


Abbildung 2.22: Screenshot der Transparenzaufgabe, chromatische Version. Bei der Darstellung am Monitor zeigte der Filter eine kreisförmige Bewegung.

Den Versuchspersonen wurde eine Versuchsanordnung am Bildschirm präsentiert, die aus 25 farbigen Quadraten besteht (Abbildung 2.22). Diese Farben wurden systematisch dem DKL-Farbraum entnommen. Gewählt wurden der graue „Weißpunkt“ sowie 24 um diesen Punkt herum ausgewählte Farben (Abbildung 2.23). Diese 25 Quadrate wurden durch eine Zufallsprozedur räumlich arrangiert. Die mittleren neun Quadrate wurden von einem bewegten Filter teilweise verdeckt. Das mittlere Quadrat, welches ganz verdeckt war, sollte beurteilt werden. In der Mitte konnten nur neun der 25 Farben (in Abbildung 2.23 mit einem Kreis markiert) liegen. Die neun zu beurteilenden Farben wurden über alle Trials von jeweils vier Filtern überdeckt, die Rot, Grün, Gelb oder Blau sein konnten. Folglich ergaben sich $4 \times 9 = 36$ Trials pro Experiment.

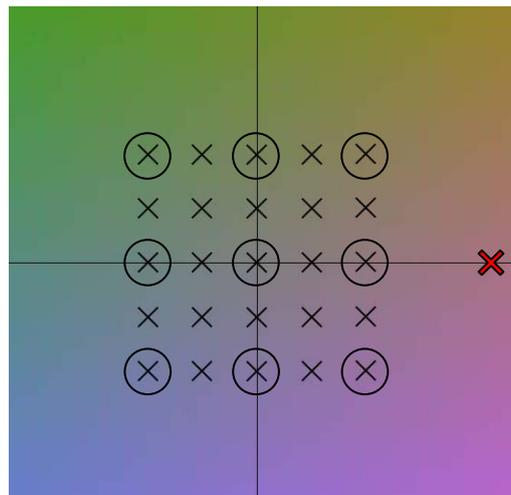


Abbildung 2.23: 25 Systematisch gewählte Farben des DKL-Raumes, diejenigen, die in der Mitte beurteilt werden sollten (mit Kreisen markiert) und die Farbe des Filters (mit rotem Kreuz markiert), in diesem Beispiel Rot.

Jeder farbige Filter hatte eine Dichte von $\alpha = 0.3$. Zur Wahl dieser Parameter sind unten die Vorexperimente beschrieben. Die Filter hatten jeweils eine Farbe von 70 % der maximal möglichen Sättigung. Das heißt in kartesischen X/Y/Z-Koordinaten lag der Rot-Filter bei 0.7/0/0, Grün bei -0.7/0/0, Gelb bei 0/0.7/0 und Blau bei 0/-0.7/0. Ein Alpha Wert von $\alpha = 0.3$ bedeutet, dass der Filter die zugrundeliegende Farbe um 30 % der Distanz zwischen zugrundeliegender Farbe und Filterfarbe veränderte.

Auf der rechten Seite des Bildschirms werden sechs Antwortalternativen in Form farbiger Quadrate vorgegeben. Unter diesen befand sich die tatsächliche Farbe hinter dem Filter und wurde mit 100% kodiert. Diese Prozentwerte waren die Punkte oder Scores, die die Versuchsperson erreichen konnte. Dieser Wert war der Farbkonstanzindex. Eine Antwort, die zu einem Farbkonstanzindex von 100 % führt, entspricht der tatsächlichen Farbe hinter dem Filter (Abbildung 2.24). Weiterhin wurde eine Antwort mit der tatsächlich sichtbaren Farbe angeboten, das heißt derjenigen, die sich aus der Kombination von Basisfarbe und Filter ergab. Diese Antwort wurde mit

0 % kodiert, entsprach also der Leistung, genau die Farbe auszuwählen, die links sichtbar war und enthielt keine Farbkonstanzleistung. Diese Leistung ließ sich eher als *Matching*, also als Zuordnung bezeichnen. Zwei weitere Antwortmöglichkeiten skalierten den Bereich dazwischen, indem sie ihn in Drittel teilten. Eine Farbe tendierte zur farbkonstanten Antwort, das heißt repräsentierte eine Mischung der tatsächlich sichtbaren Farbe und einem vermehrten Anteil der Farbe hinter dem Filter und erhielt einen Score von 67%. Die andere deutete auf eine Antwort in Richtung der Matching-Farbe hin, das heißt sie setzte sich aus der Farbe hinter dem Filter und einem vermehrten Anteil der Filterfarbe zusammen und erhielt 33 %. Die übrigen zwei Farben stellten einen Überschuss in den jeweiligen Antwortrichtungen dar. Es gab eine überschüssige Farbe in Richtung der farbkonstanten Antwort und eine überschüssige Farbe in Richtung der farbgematchten Antwort. Die räumliche Anordnung der sechs Antwort-Quadrate geschah nach dem Zufallsprinzip.

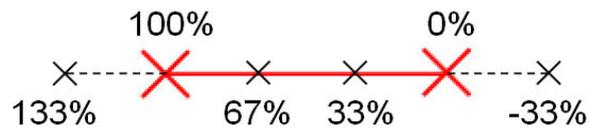


Abbildung 2.24: Die Abstufung der sechs Antwortalternativen. 100 % steht für die Farbe hinter dem Filter und 0% für die tatsächlich sichtbare Farbe.

Zusätzlich entwickelten wir eine achromatische Variante (Abbildung 2.25), die dem Aufbau der chromatischen weitgehend glich. Wiederum befand sich auf der linken Bildschirmseite eine Fläche mit 25 zufällig angeordneten Quadraten, diesmal unterschiedlicher Helligkeit. Diese waren ausschließlich der L+M-Achse des DKL-Raumes entnommen. Die Helligkeit Nummer 13 lag genau im Weißpunkt, das Quadrat Nummer 1 repräsentierte den hellsten und Quadrat Nummer 25 den dunkelsten

dargebotenen Reiz. Die Abstände zwischen den Reizen waren [0.05] arbiträrer Einheiten, d. h. sie verteilen sich von [+0.6] bis [-0.6]. Wenn man sich alle 25 achromatischen Reize als aufgereiht auf der L+M-Achse vorstellt, wobei der Reiz Nummer 13 das mittlere Grau (auf der gleichen DKL-Ebene, die wir auch im Farb-Experiment. verwenden) darstellt, dann waren die neun zu beurteilenden Stimuli die Nummern: 1, 3, 5, 11, 13, 15, 21, 23, 25.

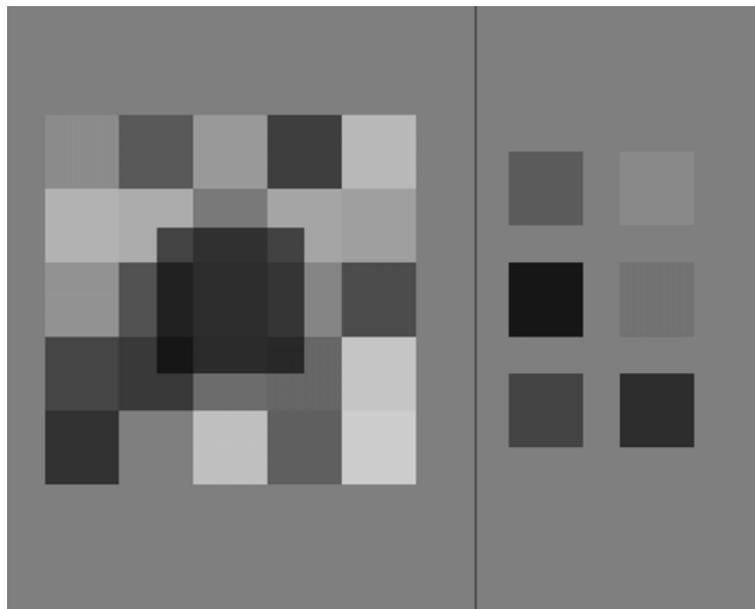


Abbildung 2.25: Screenshot der Transparenzaufgabe, achromatische Version. Bei der Darstellung am Monitor zeigte der Filter eine kreisförmige Bewegung.

Im Gegensatz zur chromatischen Variante gab es hier nur einen Filter, der die Helligkeit des mittleren Quadrats mit einem Filter $\alpha = 0.6$ abdunkelte. Abhängig von der Helligkeit des Reizes unter dem Filter variierte die Änderung durch den Filter bis zu einem Maximalpunkt von [-1], also schwarz. Die sechs Antwortquadrate ergaben sich auf dieselbe Art und Weise wie bei der chromatischen Variante, nur dass es sich hier um Quadrate unterschiedlicher Helligkeit handelte. Auch bei dieser Aufgabe gab es 36

Durchgänge. Jedes der neun zu beurteilenden Quadrate wurde folglich viermal unter dem gleichen Filter beurteilt.

Wahl der Parameter für die Transparenzaufgabe

Bis zur Erstellung der endgültigen Transparenzaufgabe wurden einige Vorversuche für die besten Parameter durchgeführt. So stellte sich die Frage nach dem Hintergrund, Antwortalternativen, Strategien bei der Aufgabenbewältigung, Dichte der Filter und Bearbeitungszeit.

Vorversuch: Antwort auswählen oder einstellen.

Methode

In der Frage um eine geeignete Antwortmöglichkeit wurden zwei Varianten getestet. Zum einen wurde, wie oben beschrieben, aus sechs möglichen Quadraten eines gewählt und mittels Tastendruck bestätigt. Zum anderen wurde den Versuchspersonen nur ein Quadrat auf der rechten Seite dargeboten, das in seiner Farbe justiert werden konnte (Abbildung 2.26). Die Justierung erfolgte eindimensional, das heißt bei roten und grünen Filtern nur auf der Rot-Grün-Achse. Verwendet wurden die Tasten 4 „Mitte links“ um Grün zu addieren und 6 „Mitte rechts“ um Rot zu addieren. Entsprechend wurden bei blauen und gelben Filtern nur die Blau- und Gelb-Taste verwendet. Hier bedeutete die Taste 8 „oben Mitte“ das Hinzufügen von Gelb und die Taste 2 „unten Mitte“ das Hinzufügen von Blau.

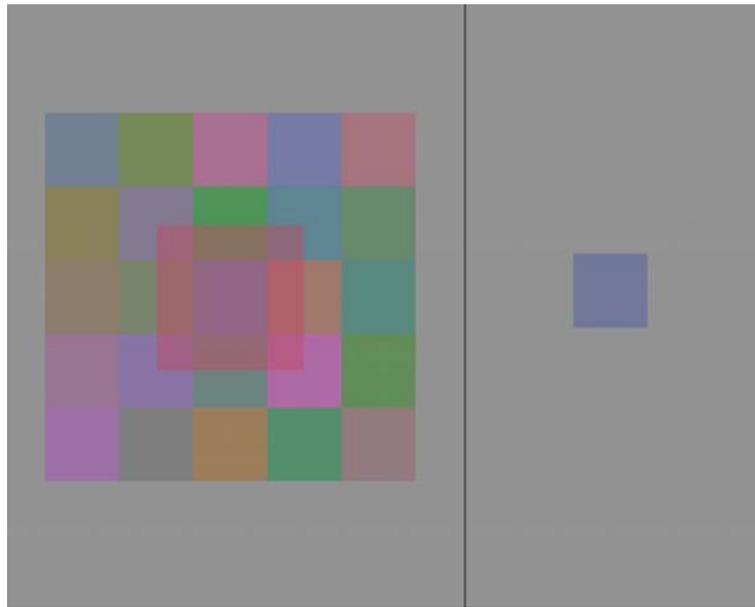


Abbildung 2.26: Screenshot der Transparenzaufgabe, chromatische Version, Antwortmöglichkeit durch Einstellen der gewünschten Farbe.

Dieser Versuch wurde mit der chromatischen Version der Transparenzaufgabe durchgeführt. Die Aufgabe war bei der kategorialen Antwortmöglichkeit dasjenige Quadrat zu wählen, welches dem hinter dem Filter entsprach. Bei der Anpassungsvariante sollte die Farbe eingestellt werden, die hinter dem Filter vermutet wird. Erwartet wurden bedeutsame Unterschiede in den Antwortenleistungen, wenn die Versuchspersonen die Aufgabe mit einem der beiden Antwortsysteme besser lösen könnten als mit dem anderen.

Die Versuchspersonen ($n = 4$) waren männlich oder weiblich, zwischen 27 und 37 Jahren alt und hatten einen akademischen Berufshintergrund.

Ergebnisse

Die Ergebnisse in beiden Versuchsbedingungen unterschieden sich nicht bedeutsam voneinander (Abbildung 2.27). Die Versuchspersonen erreichten bei der Wahl aus Sechs einen Konstanzindex von 61.75 % ($SE = 9.03$). Beim Justieren der Farbe waren sie unwesentlich besser und erreichten einen Index von 71.08 % ($SE = 12.29$). Die Unterscheidung in Rot/Grün und Blau/Gelb (nicht in der Abbildung) erbrachte keine zusätzlichen Informationen. Bei roten und grünen Filtern erreichten die Versuchspersonen bei Wahl aus Sechs 63.93 % und bei Justierung 76.31 %. Hingegen wurden bei blauen und gelben Filtern 59.58 % (Wahl aus Sechs) und 68.1 % (bei Justierung) erzielt. Die Standardfehler lagen zwischen 7.4 und 14.5.

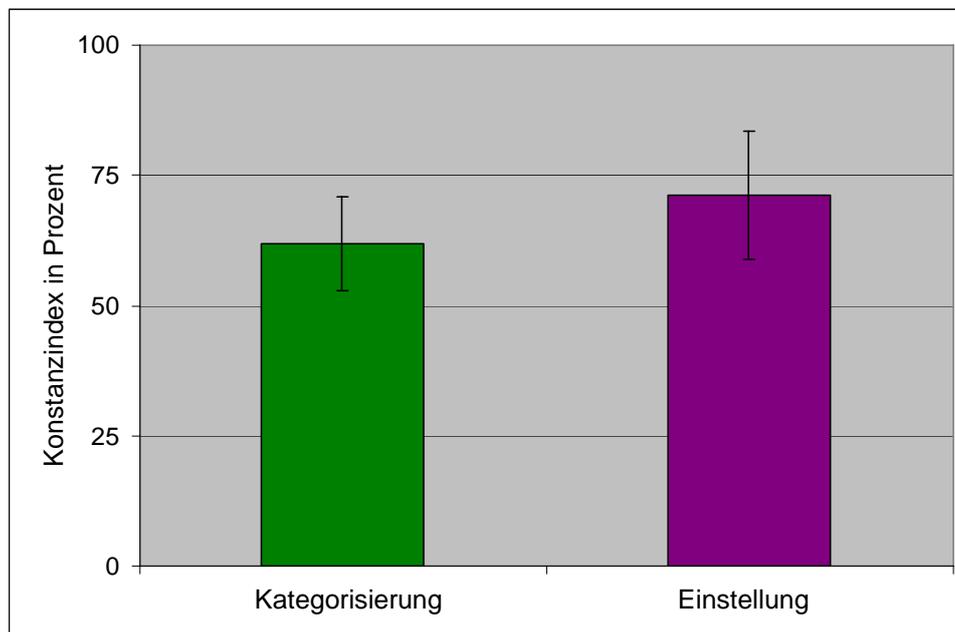


Abbildung 2.27: Ergebnisse in der chromatischen Transparenzaufgabe bei unterschiedlich Antwortmöglichkeiten; Auswählen aus Kategorien vs. Anpassen per Einstellung.

Im T-Test zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten ($p = 0.503$). Bei aufgeschlüsselten Ergebnissen für Rot/Grün ($p = 0.392$) und Blau/Gelb ($p = 0.597$) ergaben sich ebenfalls keine weiterführenden Hinweise auf Unterschiede.

Diskussion

Offensichtlich erbringt keine Antwortmöglichkeit Vorteile vor der jeweils anderen. Allerdings muss mit in Betracht gezogen werden, dass die Durchführung der Aufgaben für die Patienten eine möglichst bedienerfreundliche Steuerung haben muss. Wenn keine Methode vor der anderen in den erbrachten Leistungen hervorsteht, sollte die einfachste Variante beibehalten werden. Nicht alle Patienten haben die motorischen Fähigkeiten die Tasten zu bedienen, geschweige denn, mit ihnen feine Justierungen vorzunehmen. Die Antwortmethode „Wahl aus Sechs“ hat den Vorteil, dass feinmotorisch unbeeinträchtigte Personen die Tasten selbst bedienen können, während hemiplegische oder ataktische Patienten entweder grob auf das gewählte Quadrat am Monitor zeigen können oder es verbal benennen. Beim Justieren der Farbe durch Tastendruck kann der Versuchsleiter keinesfalls die Tasten stellvertretend bedienen. Die Informationsverluste, die hierbei entstehen würden, wären bei dieser feinen Einstellung zu bedeutsam. Die Justierung ist sogar bei gesunden Versuchspersonen zeitaufwändig und bei manchen Patienten ein zusätzlicher Stressor. Obendrein zieht eine Tastatur häufig die visuelle Aufmerksamkeit der Versuchsperson ab, im besonderen Fall, wenn ältere oder computerunerfahrene Personen sich an die Bedienung eines Tastenblocks erst gewöhnen müssen. Für die folgenden Experiment wird die Antwortmethode „Wahl aus Sechs“ beibehalten.

Vorversuch: Bearbeitungszeit unbegrenzt.

In ersten Durchgängen zur Transparenzaufgabe wurde den Versuchspersonen soviel Zeit gelassen wie sie benötigten, um eine Entscheidung zu treffen. Dieser Vorversuch hat gezeigt, dass die Aufgabe die Schwierigkeit bergen kann, dass die Versuchspersonen eine kognitive Problemlösestrategie entwickeln. Nach Selbstberichten wurde versucht, unter den acht halbverdeckten Quadraten dasjenige zu finden, welches dem ganz verdeckten in der Mitte am ähnlichsten ist und dann ein äquivalentes aus den sechsen am rechten Rand zu wählen. Aus der ursprünglichen Transparenzaufgabe sind so zwei Matching-Aufgaben geworden. Der erste Vergleich erfolgte zwischen dem ganz verdeckten mittleren Quadrat und den verdeckten Teilen der umliegenden acht. Der zweite Vergleich diente dazu, den Teil des vorher gewählten Quadrates, der unter dem Filter hervorschaute, mit einer möglichst passenden Farbe aus den Antworten zu vergleichen. Diese Vergleichsstrategien haben bis zu 60 Sekunden pro Trial in Anspruch genommen und das Experiment in die Länge gezogen. Außerdem wurde auf diese Weise die Intention der Aufgabe verfehlt. Es sollte nicht eine Problemlösestrategie entwickelt werden, sondern ein Urteil auf der Basis der subjektiven Wahrnehmung getroffen werden. Um dies zu vermeiden, wurde die Antwortzeit zeitlich begrenzt, das heißt nach einer Zeitspanne von zehn Sekunden bei gesunden Probanden und 30 Sekunden bei Patienten verschwand die Darbietung der 25 farbigen Quadrate und es blieben nur die Antwortmöglichkeiten bestehen. So blieb genug Zeit, um in mehreren Sakkaden das Zielquadrat mit den Antworten zu vergleichen, aber nicht genug, um weitere Vergleiche innerhalb der Versuchsanordnung anzustellen.

Welchen Alpha-Wert für den Filter?

Die Frage nach dem Alphawert des Filters ist von besonderer Bedeutung. Wie oben beschrieben, bestimmt die Entfernung im Farbraum zwischen der sichtbaren Farbe und der dahinterliegende Farbe den Range der möglichen sechs Antworten. Das heißt, je blickdichter ein Filter ist, desto weiter liegen die Antworten auseinander (Abbildung 2.28). Das macht die Wahl zwischen den Antworten einfacher, aber erschwert das Wahrnehmen der Farbe hinter dem Filter. Andererseits führt ein sehr durchsichtiger Filter zu sehr dicht beieinander liegenden Antworten. Es ist hierbei relativ einfach, durch den Filter zu sehen, aber die Auswahl der Antworten ist erheblich erschwert.

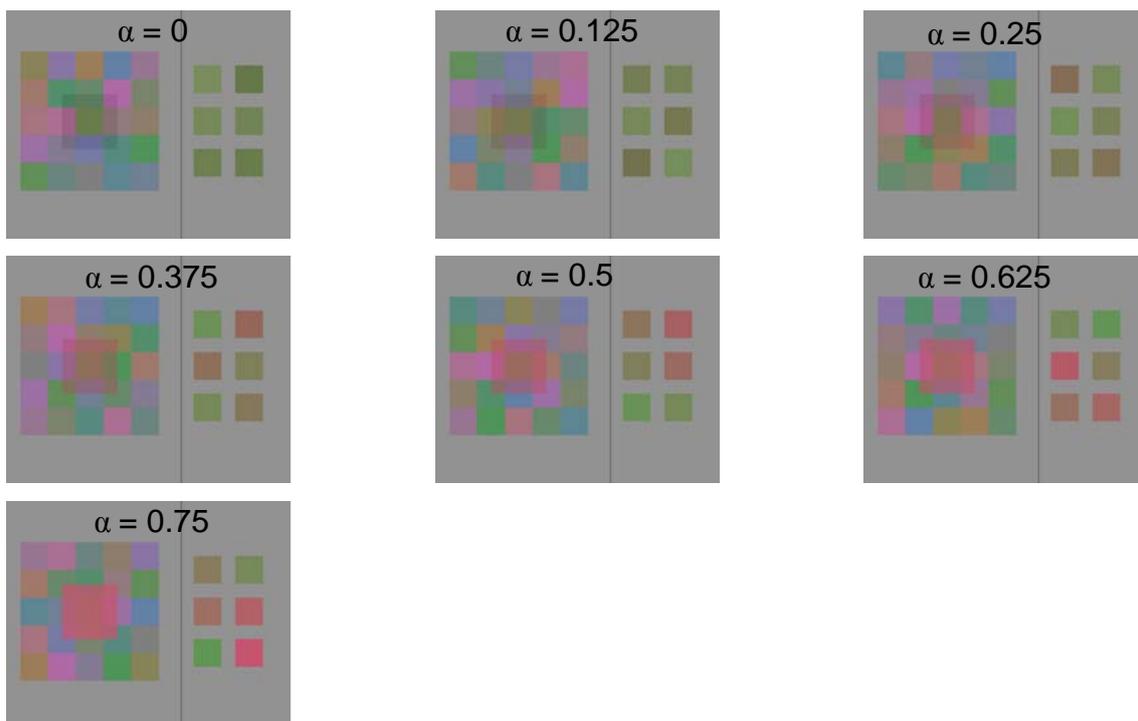


Abbildung 2.28: Filter mit verschiedenen Alpha-Werten. Je dichter der Filter, desto weiter liegen die Antworten auseinander.

Dieser Vorversuch, um die Durchlässigkeit des Filters zu bestimmen, wurde mit zwei unterschiedlichen Bearbeitungszeiten (zwei und zehn Sekunden) durchgeführt.

Vorversuch: Bearbeitungszeit zwei Sekunden.

Um die Bearbeitungszeit zu optimieren und zu überprüfen, ob die Leistung bei zu strengem Zeitdruck auf Wahrscheinlichkeitsniveau absinkt, wurde den Versuchspersonen für die Auswahl nur 2 Sekunden Zeit gelassen. Die Idee dahinter war, dass bei so kurzer Zeitspanne nur ein Blick auf das zu beurteilende Quadrat und ein Blick auf die Antwortalternativen möglich war. Die Möglichkeit zu mehr als einem einzigen Vergleich wurde hierdurch eliminiert.

Methode

Die Größe der Alpha-Werte der Filter beziehungsweise ihre Dichte war in diesem Vortest die unabhängige Variable. Sie wurde in folgenden Werten variiert: 0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75.

Dieser Versuch wurde mit der chromatischen Version der Transparenzaufgabe durchgeführt. Die Aufgabe war, aus den Antwortmöglichkeiten diejenige Farbe zu wählen, die dem Quadrat hinter dem Filter entsprach. Erwartet wurden Konstanz-Indizes, die sich nahe 100 % bewegten, wenn die Versuchspersonen die Aufgabe lösen konnten und auf Wahrscheinlichkeitsniveau absinken müsste, wenn nicht.

Die Versuchspersonen ($n = 3$) waren weiblich, zwischen 27 und 33 Jahren alt und hatten einen akademischen Berufshintergrund.

Ergebnisse

Über die drei Versuchspersonen zeigte sich im Mittel sehr deutlich ein Abfall der Leistung bis auf Wahrscheinlichkeitsniveau (Abbildung 2.29). Die rote Linie beschreibt die Ergebnisse bei den Durchgängen, in denen ein roter oder ein grüner Filter verwendet wurde. Die blaue Linie stellt die Leistung bei blauen oder gelben Filtern dar. Die Schwarze Linie ist gebildet aus den Mittelwerten von Rot-Grün und Blau-Gelb. Bei sehr stark durchlässigen Filtern (0, 0.125) zeigten sich relative hohe Werte von 90.7 % und 79.9 %, die sich mit $p = 0.04^*$ und $p = 0.05(^*)$ bedeutsam vom Wahrscheinlichkeitsniveau von 50 % unterschieden beziehungsweise dicht dazu tendierten. Je blickdichter der Filter wurde, desto mehr sank die Leistung der Versuchspersonen und pendelte bei Filtern mit $\alpha = 0.25$ und $\alpha = 0.75$ zwischen 58 % ($p = 0.676$) und 39 % ($p = 0.413$).

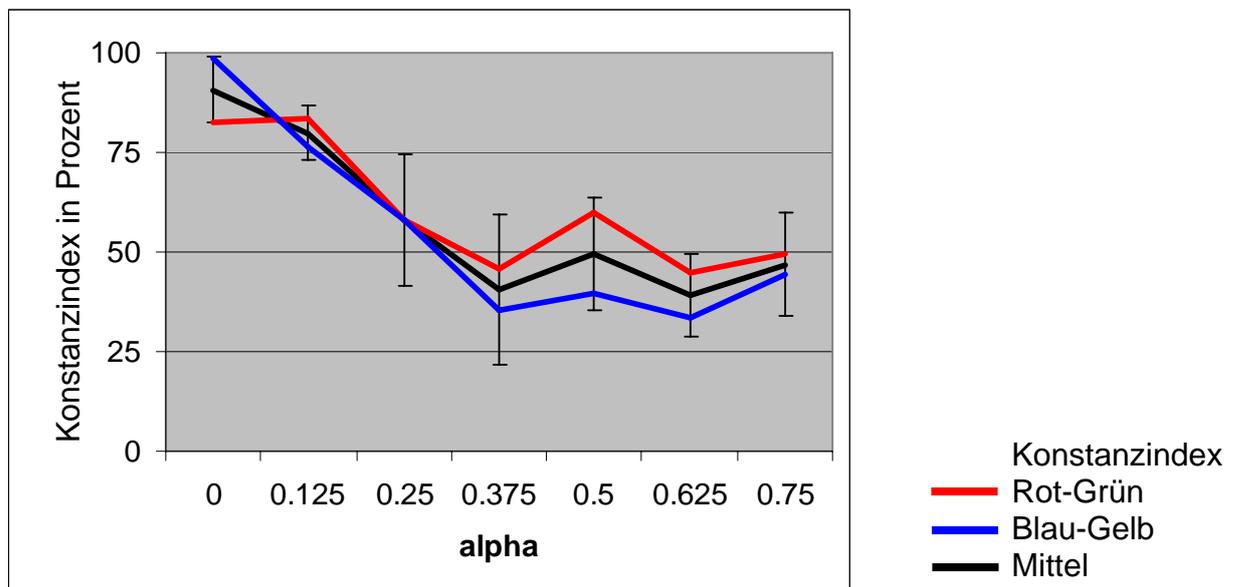


Abbildung 2.29: Ergebnisse in der chromatischen Transparenzaufgabe bei unterschiedlich durchlässigen Filtern und zwei Sekunden Antwortzeit.

Diskussion

Bei Filtern mit großer Lichtdurchlässigkeit sind die Versuchspersonen trotz der kurzen Antwortzeit in der Lage, relativ sicher das richtige Quadrat aus den Antwortalternativen zu wählen. Die erreichten Ergebnisse liegen im Bereich farbkonstanter Antworten. Mit zunehmender Blickdichte sinkt jedoch die Leistung ab und pendelt um das Wahrscheinlichkeitsniveau von 50 %. Die zu kurze Antwortzeit verhindert ein ausreichendes Vergleichen der Antworten mit dem zu beurteilenden Zielreiz, weshalb die Versuchspersonen auf eine Ratestrategie zurückgreifen.

Vorversuch: Bearbeitungszeit zehn Sekunden.

Methode

Im folgenden Versuch wurde den Versuchspersonen zehn Sekunden Zeit für jede Antwort gelassen. Somit wurden Sakkaden ermöglicht, die einen Abgleich zwischen dem zu beurteilenden Quadrat und allen sechs Antwortalternativen zuließen. Elaborierte Strategien waren hier ebenfalls nicht möglich.

Die Alpha-Werte der Filter waren identisch wie oben beschrieben. Das Reizmaterial war chromatisch, die Aufgabe identisch. Es sollte aus den Antwortmöglichkeiten diejenige Farbe gewählt werden, die dem Quadrat hinter dem Filter entsprach. Erwartet wurden Konstanz-Indizes, die sich nahe 100 % bewegten, wenn die Versuchspersonen die Aufgabe lösen konnten und auf Wahrscheinlichkeitsniveau absinken müsste, wenn nicht.

Die Versuchspersonen ($n = 4$) waren weiblich, zwischen 27 und 33 Jahren alt und hatten einen akademischem Berufshintergrund.

Ergebnisse

Es zeigt sich ein leichter Abfall aller Leistungen (Abbildung 2.30). Sowohl bei roten und grünen Filtern (rote Linie) als auch bei blauen und gelben Filtern (blaue Linie). Die schwarze Linie ist berechnet aus den Mittelwerten von Rot-Grün und Blau-Gelb. Bei sehr stark durchlässigen Filtern ($\alpha = 0$) zeigt sich im Mittel eine nahezu perfekte Farbkonstanz (97.6 %), die sich bedeutsam ($p = 0.004^{**}$) vom Wahrscheinlichkeitsniveau unterscheidet. Ebenso finden sich gute Leistungen bei $\alpha = 0.125$ mit 83.3 % ($p = 0.002^{**}$) und bei $\alpha = 0.25$ mit 81.4 % ($p = 0.036^*$). Die Ergebnisse bei den übrigen Alphawerten (von 63.0 % bis 69.6 %) unterscheiden sich nicht vom Zufallsniveau (von $p = 0.101$ bis $p = 0.164$).

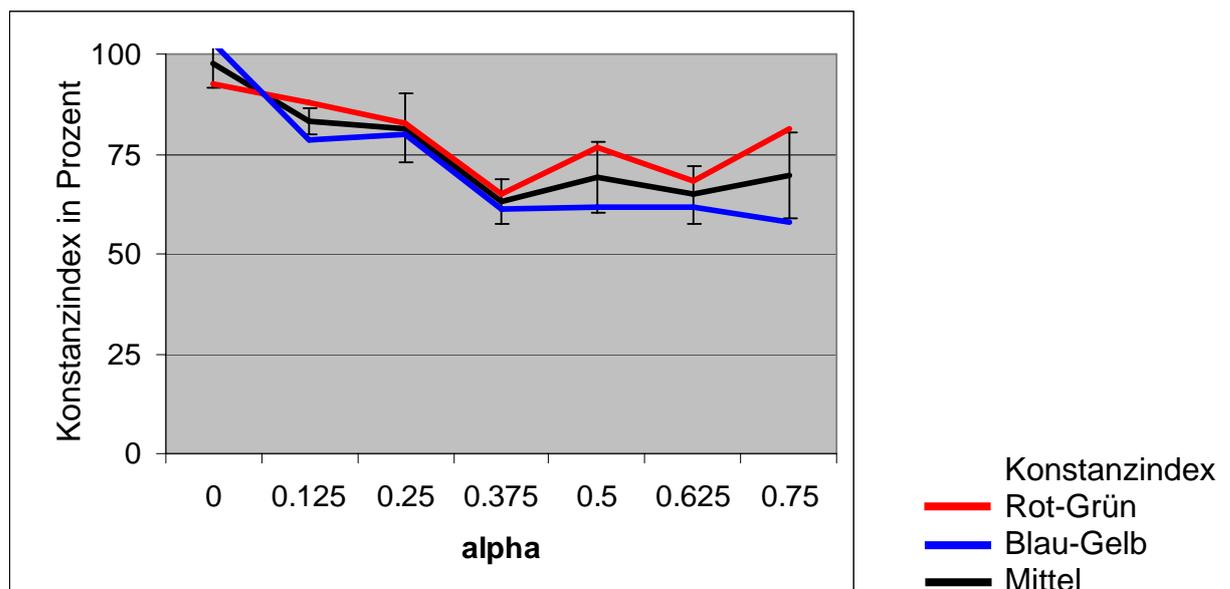


Abbildung 2.30: Ergebnisse in der chromatischen Transparenzaufgabe bei unterschiedlich durchlässigen Filtern und zehn Sekunden Antwortzeit.

Diskussion

Auch hier waren die Versuchspersonen bei Filtern mit hoher Durchlässigkeit in der Lage relativ gut, das richtige Quadrat aus den Alternativen zu wählen. Bis zu einem α von 0.25 waren die Ergebnisse bedeutsam, ab $\alpha = 0.375$ waren sie es nicht mehr. Um dicht bei der Schwelle zu bleiben, wurden für folgende Experimente mit gesunden Probanden und Patienten bei dem chromatischen Reizmaterial der Alphaswert 0.3 beibehalten.

Vorversuch: Hintergrund der achromatischen Version – schwarz.

Methode

In der achromatischen Variante wurden die Stimuli vor einem schwarzen Hintergrund dargeboten. Es wurden sieben Filter mit verschiedenen Alphaswerten verwendet. Die Aufgabe war, aus den Antwortmöglichkeiten diejenige Helligkeit zu wählen, die dem Quadrat hinter dem Filter entsprach. Die Erwartung waren Konstanz-Indizes, die sich nahe 100 % bewegten, wenn die Versuchspersonen die Aufgabe lösen konnten und auf Wahrscheinlichkeitsniveau absinken mussten, wenn nicht.

Die Versuchspersonen ($n = 3$) waren weiblich, zwischen 24 und 33 Jahren alt und hatten einen akademischen Berufshintergrund.

Ergebnisse

Über alle Filter hinweg zeigten sich bei den drei Versuchspersonen im Mittel sehr geringe Werte (Abbildung 2.31) zwischen 25.9 % und 46.8 %. Nur die Werte 43 % bei einem Alpha von 0 und 25,9 % bei einem Alpha von 0.25 unterscheiden sich bedeutsam vom Wahrscheinlichkeitsniveau 50 % bei p-Werten von 0.032 und 0.023. Sie tendieren jedoch zum Wertebereich, der bei einer Matchingaufgabe erwartet würde. Alle anderen Werte unterscheiden sich im Einstichproben T-Test nicht signifikant vom Wahrscheinlichkeitsniveau.

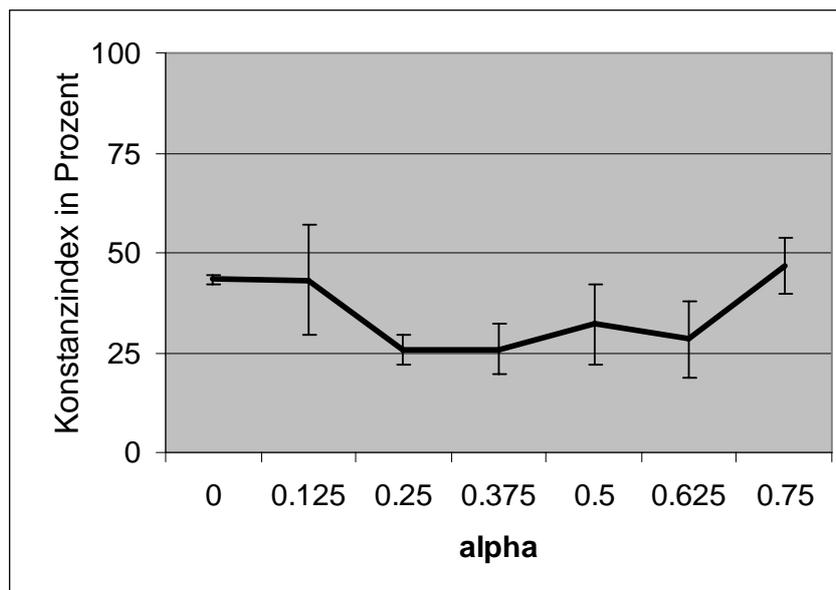


Abbildung 2.31: Ergebnisse in der achromatischen Transparenzaufgabe vor schwarzem Hintergrund bei unterschiedlich durchlässigen Filtern.

Diskussion

Die Ergebnisse weisen entweder auf eine zufällige Wahl der Antwort hin oder tendieren gegen Ergebnisse, die bei einer Matching-Aufgabe zu erwarten gewesen

wären. Offensichtlich erzeugt der schwarze Hintergrund hinter den Antwortquadraten einen so starken Simultankontrast, dass ein Bearbeiten der eigentlichen Aufgabe nicht mehr möglich ist. Bei allen folgenden achromatischen Darbietungen wurde ein neutraler grauer Hintergrund gewählt, um mögliche Beeinflussungen durch Simultankontraste zu minimieren.

Vorversuch: Hintergrund der achromatischen Version – mittleres grau.

Methode

Bei der Helligkeitsvariante wurde der Hintergrund durch ein mittleres Grau ersetzt. Wieder wurden sieben Filter mit verschiedenen Alphawerten verwendet. Die Aufgabe war ebenfalls, aus den Antwortmöglichkeiten diejenige Helligkeit zu wählen, die dem Quadrat hinter dem Filter entsprach. Die Erwartung waren Konstanz-Indizes, die sich nahe 100 % bewegten, wenn die Versuchspersonen die Aufgabe lösen konnten und auf Wahrscheinlichkeitsniveau absinken würden, wenn nicht.

Die Versuchspersonen ($n = 4$) waren weiblich, zwischen 24 und 30 Jahren alt und hatten einen akademischen Berufshintergrund.

Ergebnisse

Bei blickdichten Filtern waren statistisch signifikante Unterschiede vom Zufallsniveau zu verzeichnen (Abbildung 2.32). So erreichten die vier Versuchspersonen bei $\alpha = 0.25$ 69.5 % ($p = 0.009^{**}$), bei $\alpha = 0.375$ 84.3 % ($p =$

0.011*), bei $\alpha = 0.5$ 79.6 % ($p = 0.011^*$), bei $\alpha = 0.625$ 88.0 % ($p = 0.008^{**}$) und bei $\alpha = 0.75$ 87.1 % ($p = 0.004^{**}$).

Bei sehr durchlässigen Filtern ($\alpha = 0$ und $\alpha = 0.125$) unterscheiden sich die Ergebnisse im Einstichproben T-Test nicht vom Wahrscheinlichkeitsniveau.

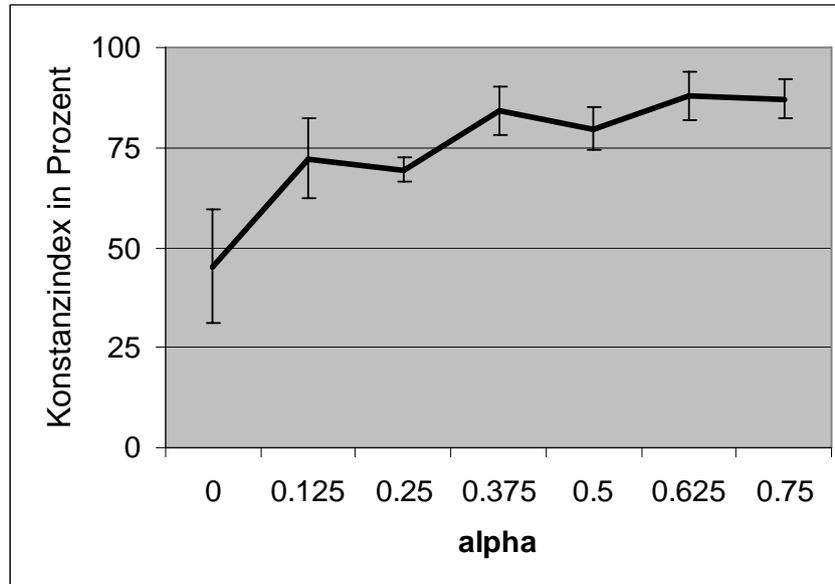


Abbildung 2.32: Ergebnisse in der achromatischen Transparenzaufgabe vor einem Hintergrund mittleren Graus bei unterschiedlich durchlässigen Filtern.

Diskussion

Diesmal erzielten die Versuchspersonen bessere Ergebnisse, je blickdichter der Filter war. Dies lag daran, dass mit dichterem Filter die Abstände zwischen den Antworten größer wurden und damit eine Wahl zwischen den Alternativen leichter fiel. Bei sehr durchlässigen Filtern lagen die Antworten zu dicht beisammen und ließen ein genaues Unterscheiden nicht zu. Im direkten Vergleich wirkt der achromatische Filter auch überzeugender, wenn er etwas dunkler gehalten wird. Für folgende Experimente

behielten wir einen Filter mit einem Alphawert von 0.6 für die achromatische Aufgabe bei.

Zusammenfassung der Vorversuche.

In dem Vortest wurden die geeignetsten Parameter für weiterführende Validierungen bestimmt. Wir behielten bei allen Aufgaben einen Hintergrund mit mittlerem Grau bei. Die Antwort wird aus sechs vorgegebenen Alternativen gewählt. Um kognitive Strategien zu vermeiden, wurde die Antwortzeit bei gesunden Versuchspersonen auf 10 Sekunden, bei Patienten auf 30 Sekunden beschränkt. Der Filter in der achromatischen Version wird auf ein Alpha von 0.6 gesetzt, in der chromatischen Version ist $\alpha = 0.3$.

Versuch: Farbkonstanz und Anpassungsleistung

Im folgenden Versuch soll überprüft werden, ob Versuchspersonen perzeptuell in der Lage sind sowohl farbkonstante als auch Anpassungsleistung (Matching) zu erbringen. Matchingleistung beschreibt hier die Fähigkeit, eine Farbe genau wiederzuerkennen. Weiterhin war zu klären, ob die Konstanzleistung korrelativ mit der Matchingleistung zusammenhängt oder ob die erbrachten Ergebnisse sich bedeutsam unterscheiden. Wir erwarteten bedeutsame Unterschiede in den Ergebnissen zwischen Matching- und Konstanzaufgabe. Erst dann konnten wir die Versuchsanordnung als valide und die Instruktionen als verständlich betrachten.

Eine Stichprobe von 26 Versuchspersonen führte vier Tests hintereinander am Computer durch. Von diesen überprüften jeweils zwei die Matchingleistung und zwei die

Konstanzleistung der Versuchspersonen. Beide Tests fanden einmal mit chromatischen und einmal mit achromatischen Stimuli statt. Im T-Test für gepaarte Stichproben zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den beiden Leistungen. Die Versuchspersonen waren sehr gut in der Lage, zwischen den beiden Aufgaben Matching und Konstanz zu unterscheiden. Ausgekoppelte Analysen finden sich bei Hilber (2006).

Methode

Versuchspersonen

Die Versuchsdurchführung bestand aus einer Sitzung. Es nahmen sechs männliche und 20 weibliche Versuchspersonen teil. Sie waren zwischen 19 und 51 Jahre ($M = 22,62$ Jahre) alt und wurden per Aushang oder persönlicher Ansprache akquiriert. Die Versuchspersonen wurden entweder finanziell nach Aufwand oder mit Versuchspersonenstunden belohnt.

Die Versuchspersonen waren alle naiv bis auf den Untersuchungsgegenstand der Farbwahrnehmung. Auch hier wurden im Vorfeld eine Versuchspersonen-Anamnese durchgeführt, bei der Farbfehlsichtigkeiten, Augenerkrankungen sowie etwaige neurologische, neurogenerative, oder psychische Krankheiten ausgeschlossen wurden. Ebenfalls wurden Vortests zur Sehschärfeprüfung (Landolt), Kontrastsensitivität (Pelli-Robson) und Farbsehen (Ishihara) durchgeführt, um basale visuelle Funktionen zu überprüfen.

Die Dauer des gesamten Experiments mit vorheriger Anamnese und Vortests betrug bis zu 50 Minuten, je nach Geschwindigkeit der Versuchsperson.

Versuchsplan

Jede Versuchsperson durchlief vier Tests, mit Möglichkeiten zu Pausen dazwischen. Zu Beginn wurden die Matchingaufgaben durchgeführt, zuerst in der chromatischen Variante, dann mit achromatischen Stimuli. Danach wurden die Konstanzinstruktionen gegeben, wiederum mit chromatischen Stimuli und achromatischen Reizen zuletzt. Die Programme waren identisch, wurden jedoch mit unterschiedlichen Instruktionen (siehe Anhang G) dargeboten. Die Versuchspersonen wurden darauf hingewiesen, dass die Reaktionszeit weder gemessen wird noch von Bedeutung ist. In einer Übungsphase von fünf Trials konnten sich die Versuchspersonen mit der Aufgabenstellung und den zu benutzenden Tasten vertraut machen.

Material und Stimuli

Die Versuchspersonen absolvierten ihre Tests an einem gamma-korrigierten iiyama VisionMaster 19“ Bildschirm unter Steuerung eines Pentium Prozessor (512 MB RAM, 1.6 GHz) im Farblabor der Justus-Liebig-Universität. Die Bildwiederholungsrate betrug 85 Hz. Die rechteckige Präsentationsfläche maß 38,0 cm (horizontal) x 29,0 cm (vertikal). Die Reizfläche entsprach einer Breite von 32,3° Sehwinkel und einer Höhe von 25,8° Sehwinkel. Für die Bearbeitung der Tests wurden Stuhl und Kinnstütze so eingestellt, dass sich der Kopf der Versuchsperson ungefähr auf mittlerer und zentrierter Höhe zum Bildschirm befand. Die Farben der Stimuli wurden dem DKL-Farbraum entnommen.

Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden im Mittel, aber auch jeweils getrennt für rot/grüne und blau/gelbe Filter betrachtet. Die Ergebnisse für die Leistung im Mittel werden in den Tabellen als „allgemein“ bezeichnet. Die Leistungen bei achromatischen Reizen werden im Folgenden auch als „Helligkeit“ benannt.

Die Tabelle 2.1 zeigt die deskriptive Statistik der Ergebnisse. Es muss weiterhin beachtet werden, dass bei der Konstanzaufgabe die richtigen Antworten bei 100 % liegen, wobei bei der Matching-Aufgabe die richtige Antwort 0 % ist. In der Matching-Aufgabe erzielen die Versuchspersonen einen Mittelwert von 21.79 % ($SE = 2.33$). Bei den einzelnen Teilleistungen zeigen sich leicht geringere Werte für Blau/Gelb (20.34 %, $SE = 2.55$) als für Rot/Grün (23.23 %, $SE = 2.29$). Dieser Unterschied ist im T-Test für abhängige Stichproben bedeutsam ($p = 0.042$ *). In der achromatischen Version war der erreichte Mittelwerte am höchsten ($M = 27.91$, $SE = 2.74$). Bei der Konstanzaufgabe zeigten die Ergebnisse im Mittel bei der achromatischen Variante die beste Leistung ($M = 78.24$, $SE = 4.67$), während der schlechteste Mittelwert im Farbbereich Blau-Gelb erzielt wurde ($M = 65.93$, $SE = 5.46$).

Tabelle 2.1: Mittelwerte und Standardabweichungen der Testleistungen in Matching- und Konstanzaufgaben.

	Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler
Matching-allgemein	21,7862	26	11,87425	2,32873
Matching-Rot-Grün	23,2331	26	11,68557	2,29173
Matching-Blau-Gelb	20,3396	26	13,00264	2,55003
Matching-Helligkeit	27,9100	26	13,98903	2,74348
Konstanz-allgemein	69,8781	26	26,81808	5,25946
Konstanz-Rot-Grün	73,8254	26	28,41861	5,57335
Konstanz-Blau-Gelb	65,9292	26	27,84337	5,46054
Konstanz-Helligkeit	78,2435	26	23,83647	4,67472

Die erreichten Mittelwerte bei der Matching-Aufgabe führen zu der Annahme, dass es den Versuchspersonen am leichtesten fiel, eine Farbe aus dem Farbbereich Blau-Gelb wieder zu erkennen. Am schwersten scheint ihnen die Wiedererkennung bei der achromatischen Variante der Aufgabe gefallen zu sein. Bei der Konstanzaufgabe präsentieren die Mittelwerte ein umgekehrtes Ergebnis. Die Fähigkeit, eine Farbe trotz Filter richtig zu bestimmen ist damit tendenziell im achromatischen Bereich stärker ausgeprägt als im chromatischen.

Die Korrelationen (Tabelle 2.2) zwischen Matching und Konstanzleistung zeigen, dass kein signifikanter Zusammenhang herrscht. So betrug die Korrelation zwischen den Aufgaben Matching-allgemein und Konstanz-allgemein $r = .06$ ($p = 0.78$) und zwischen Matching-Helligkeit und Konstanz-Helligkeit $r = .19$ ($p = 0.35$).

Hingegen finden sich hohe Korrelationen innerhalb der Aufgaben. Die Korrelation innerhalb der Aufgaben Matching-allgemein und Matching-Helligkeit betrug $r = .71$ ($p = 0.00$ **) und zwischen Konstanz-allgemein und Konstanz-Helligkeit $r = .72$ ($p = 0.00$ **).

Tabelle 2.2: Pearson Produkt-Moment-Korrelation der Testleistungen in Matching- und Konstanzaufgaben.

	N	Korrelation	Signifikanz
Matching-allgemein & Matching-Helligkeit	26	,713	,000
Matching-Rot-Grün & Matching-Blau-Gelb	26	,850	,000
Konstanz-allgemein & Konstanz-Helligkeit	26	,715	,000
Konstanz-Rot-Grün & Konstanz-Blau-Gelb	26	,818	,000
Matching-allgemein & Konstanz-allgemein	26	,059	,775
Matchin-Rot-Grün & Konstanz-Rot-Grün	26	-,083	,686
Matching-Blau-Gelb & Konstanz-Blau-Gelb	26	,178	,384
Matchin-Helligkeit & Konstanz-Helligkeit	26	,189	,354

Ebenfalls finden sich hohe Korrelationen zwischen den Teilleistungen Rot/Grün und Blau/Gelb. Bei der Korrelation zwischen Konstanz-Rot-Grün und Konstanz-Blau-Gelb ergab sich ein Wert von $r = .82$. ($p = 0.00 **$) Bei der Matching-Aufgabe hingegen ergaben sich eine Korrelation von $r = .85$. ($p = 0.00 **$) zwischen Rot/Grün und Blau/Gelb (Tabelle 2.2).

Mittels T-Test für gepaarte Stichproben (Tabelle 2.3) wurde überprüft, ob zwischen den Mittelwerten der Konstanz- und Matchingleistung bedeutsame Unterschiede vorlagen. In der Tat konnten bei allen Vergleichen signifikante Haupteffekte festgestellt werden. So zeigten sich bei den Vergleichen zwischen Matching-Rot/Grün und Konstanz-Rot/Grün, zwischen Matching-Blau/Gelb und Konstanz-Blau/Gelb (dadurch folglich auch bei den allgemeinen Werten) sowie bei den Vergleichen zwischen den Helligkeitsaufgaben Unterschiede bei $p = 0.00 **$: Die Ergebnisse der T-Tests zeigen, dass die Versuchspersonen dieser Stichprobe sehr gut zwischen der Konstanz- und der Matching-Aufgabe unterscheiden konnten.

Tabelle 2.3: T-Test für gepaarte Stichproben der Testleistungen in Matching- und Konstanzaufgaben.

	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler	T	df	Sig. (2-seitig)
Matching-allgemein & Konstanz-allgemein	-48,0919	28,68218	5,62504	-8,550	25	,000
Matching-Rot-Grün & Konstanz-Rot-Grün	-50,5923	31,61452	6,20012	-8,160	25	,000
Matching-Blau-Gelb & Konstanz-Blau-Gelb	-45,5896	28,55484	5,60006	-8,141	25	,000
Matching-Helligkeit & Konstanz-Helligkeit	-50,3335	25,24943	4,95182	-10,165	25	,000

Im Balkendiagramm (Abbildung 2.33) sind die Mittelwertsunterschiede zwischen den Teilleistungen „Rot-Grün“, „Blau-Gelb“ und „Helligkeit“ noch einmal grafisch dargestellt. Auf der Y-Achse sind die Mittelwerte der jeweiligen Teilleistungen abgetragen. Die geringen Standardfehlerbalken verdeutlichen den signifikanten Unterschied zwischen der Matchingleistung und der Konstanzleistung. Anhand dieser Grafik lässt sich feststellen, dass die Versuchspersonen keinerlei Schwierigkeiten hatten, die zwei Aufgabentypen voneinander zu trennen. Die Ergebnisse der T-Tests beweisen, dass die Versuchspersonen dieser Stichprobe sehr gut zwischen der Konstanz- und der Matching-Aufgabe unterscheiden konnten.

Obendrein sieht man deutlich, dass die Versuchspersonen, wenn sie hohe Werte in der chromatischen Konstanz-Aufgabe erzielten, ebenfalls hohe Werte in der achromatischen Konstanz-Aufgabe erreichten. Gleiches gilt bei der Matching-Aufgabe für die niedrigen Werte.

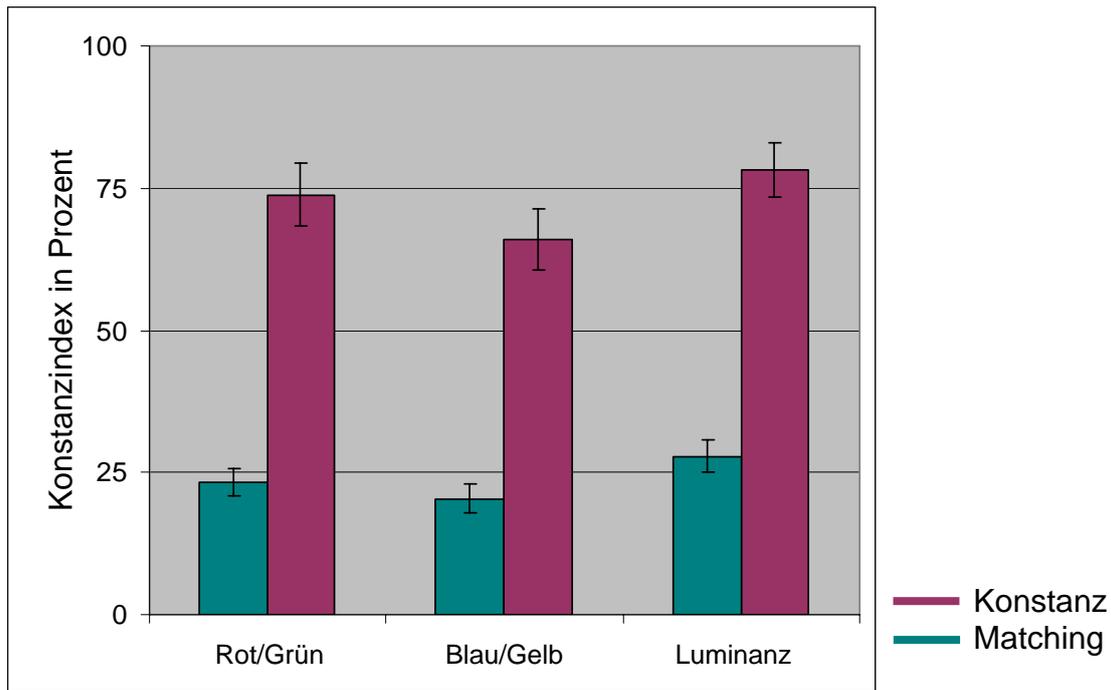


Abbildung 2.33: Leistungen bei Konstanz- und Matching-Aufgabe. Auf der Abszisse sind die Konditionen abgetragen (rot/grüne Filter, blau/gelbe Filter, achromatische Variante); auf der Ordinate ist der Konstanzindex in Prozent dargestellt (100 % ist die richtige Antwort bei Konstanz, 0 % bei Matching).

Diskussion

In unserem Vergleich zwischen Konstanzleistung und Matchingleistung wurde untersucht, ob die Leistungen zwischen farbigen und Luminanzreizen korrelativ zusammenhängt, das heißt, ob eine Versuchsperson, die gute Ergebnisse in den chromatischen Aufgaben erzielt, auch eine gute Leistungen in den achromatischen erbringt.

Wir finden hohe Korrelationen zwischen den jeweiligen Werten innerhalb der Matching- und Konstanz-Aufgabe. Folglich können Versuchspersonen die Aufgaben gleich gut lösen ungeachtet dessen, ob die Reize chromatisch oder achromatisch sind. Die zweite Frage, der wir nachgingen war, ob die Versuchspersonen fähig sein würden zwischen den beiden Aufgaben zur Messung der Matching- und Konstanzleistung zu

unterscheiden. Um die mittleren Testleistungen der Versuchspersonen in der jeweiligen Aufgabe miteinander zu vergleichen, wurden T-Tests für gepaarte Stichproben gerechnet. Diese ergaben statistisch signifikante Mittelwertsunterschiede. Dieses Ergebnis gilt auch für alle Einzelvergleiche zwischen den Teilleistungen. So konnte bewiesen werden, dass die Versuchspersonen unabhängig davon, ob die Quadrate chromatisch oder achromatisch gehalten waren, gut zwischen den beiden Aufgabentypen unterscheiden konnten.

Die verwendete Versuchsanordnung wird als valide angesehen und in dieser Form weiterverwendet. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass sich diese Form der Transparenzwahrnehmung zur Messung der Konstanzleistung eignet.

3. Normierung

Wir erhoben eine Altersstichprobe ($n = 70$), die für die Auswertung in verschiedene Dekaden (20-30 Jahre, 40-50 Jahre, 50-60 Jahre, 60-70 Jahre) aufgeteilt wurde, um die psychophysischen Reaktionen auf unsere Testbatterie im mittleren Alter zu beurteilen. Ausgekoppelte Vergleiche zwischen den Stichproben finden sich bei Seidl (2005) und von der Lahr (2006).

In der Literatur finden sich Untersuchungen, die auf eine Veränderung der Farbwahrnehmung im entwicklungspsychologischen Alterungsprozess hinweisen (Clavadetscher et al., 1988, Elsner et al., 1988, Smith et al., 1988, Werner et al., 1988, Johnson et al., 1988). Verschiedene Prozesse können im fortgeschrittenen Lebensalter Veränderungen der visuellen Wahrnehmung hervorrufen. Hierzu gehört die Erschlaffung der Ziliarmuskulatur und Verlust der Akkomodationskraft der Linse durch physiologische Alterung. In der Literatur wird ebenfalls eine Bräunung von Cornea und Linse diskutiert, die durch UV-Strahlung verursacht wird (Lindsey & Brown, 2002, 2004). So finden sich bei Stämmen, die durch äquatoriale Nähe stärker der UV-Strahlung ausgesetzt sind, andere lexikalische Einteilungen der Hauptkategorien der Farben. Eine verstärkt gebräunte Linse reduziert die Fähigkeit, Grün- und Blautöne auseinander zu halten, was sich in der stammestypischen Terminologie in einer gemeinsamen Farbkategorie „Grue“ niederschlägt, die „Green“ und „Blue“ vereint (Lindsey & Brown, 2004).

Kriterien der Voruntersuchung

Die Bedingungen für die Aufnahme in die Vergleichsstichprobe waren im Vergleich zur Patientenstichprobe (siehe dort) strenger und folgten anhängendem Katalog:

- Anamnese:
 - keine Vorgeschichte mit Augenerkrankung, wie zum Beispiel grauer Star (Katarakt), grüner Star (Glaukom) und sonstige operationsbedürftige oder operierte Augenerkrankungen
 - keine Fehlstellung der Augen (Strabismus, ... etc.)
 - keine psychischen (neurotischen oder psychotischen) Erkrankungen aktuell oder in der Vergangenheit
 - keine neurologischen Erkrankungen (Tumor, Schlaganfall, Schädel-Hirn-Trauma, Blutung, ... etc.) aktuell oder in der Vergangenheit
 - keine neurodegenerativen Erkrankungen (Multiple Sklerose, ... etc.)
- Sehschärfe: Visus von mindestens 0.8, auch mit Korrektur
- Farbsehen: keine diagnostizierten Farbfehlsichtigkeiten in der Vergangenheit, kein Wert unter 13 in den Ishihara-Tafeln, die Tafeln 14/15 durften nicht lesbar sein
- Kontrastsehen: Logarithmische Kontrast-Sensitivität mindestens 1.50
- Fähigkeit zur selbstständigen Augenfixation (visuelle Kontrolle)

Methode

Teilnehmer

Die Mitglieder der ersten Gruppe, genannt „20 – 30“ waren zwischen 20 und 29 Jahren alt ($M= 22.6$, $SD= 3.1$, $n= 37$). Diese Gruppe bestand überwiegend aus Studenten. Die zweite Gruppe „40 - 50“ umfasste Versuchspersonen zwischen 40 und 49 Jahren ($M= 44.6$, $SD= 2.7$, $n= 18$) und die dritte Gruppe „50 – 60“ beinhaltete

Versuchspersonen zwischen 51 und 58 Jahren ($M= 53.9$, $SD= 2.4$, $n= 10$), welche überwiegend Berufstätige waren. Die Gruppe „60 -70“ ($M= 64.2$, $SD= 3.7$, $n= 5$) bestand zum überwiegenden Teil aus Rentnern zwischen 60 und 69 Jahren. Die Probanden erhielten für ihre Teilnahme Versuchspersonenstunden oder eine kleine finanzielle Aufwandsentschädigung. Alle Versuchspersonen mussten den oben angegebenen Kriterienkatalog bezüglich Sehschärfe, Kontrastwahrnehmung und Farbsehen erfüllen.

Durchführung

Die Versuchspersonen durchliefen in diesem Experiment die Aufgaben Detektion, Diskrimination, Kategorisierung und Farbkonstanz (Hintergrund-Illusion). Die Transparenz-Aufgabe bestand zum Zeitpunkt der Datenerhebung noch nicht. Gemeinsam mit den Vorversuchen konnten diese innerhalb von 60 Minuten durchgeführt werden.

Ergebnisse

Vergleich der Ergebnisse von Detektion, Diskrimination und Farbkonstanz

Um zu überprüfen, ob hohe Leistungen in einer Aufgabe mit hohen Leistungen in einer anderen Aufgabe einhergehen, wurden Korrelationen zwischen den Tests zur Detektion, Diskrimination und Farbkonstanz getrennt für die Altersgruppen errechnet.

Tabelle 3.1: Pearson Produkt-Moment-Korrelation zwischen den Aufgaben bei den verschiedenen Altersstufen

Alter		20-30	40-50	50-60	60-70
Detektion - Diskrimination	Korrelation	-,161	,318	,281	,118
	Signifikanz (2-seitig)	,340	,199	,432	,850
	N	37	18	10	5
Detektion - Farbkonstanz	Korrelation	,155	,083	-,441	,906(*)
	Signifikanz (2-seitig)	,374	,742	,202	,034
	N	37	18	10	5
Diskrimination - Farbkonstanz	Korrelation	-,064	-,183	-,231	,139
	Signifikanz (2-seitig)	,713	,468	,521	,823
	N	37	18	10	5

Der einzig bedeutsame Zusammenhang findet sich zwischen Detektion und Farbkonstanz bei der Altersgruppe 60 - 70 Jahre. In keinem der anderen Zusammenhänge zeigt sich Signifikanz. Bei den 20 - 30jährigen (Tabelle 3.1) ergaben sich geringe Korrelationen von $r = -.16$ bei Detektion und Diskrimination ($p = .34$), $r = -.16$ bei Detektion und Farbkonstanz ($p = .37$) und $r = -.06$ bei Diskrimination und Farbkonstanz ($p = .71$). In der Gruppe der 40 - 50jährigen zeigten sich ebenfalls keine bedeutsamen Korrelationen bei Detektion und Diskrimination ($r = .32$, $p = .2$), Detektion und Farbkonstanz ($r = .08$, $p = .75$) und Diskrimination und Farbkonstanz ($r = -.18$, $p = .47$) sowie bei 50 - 60jährigen Korrelationen bei Detektion und Diskrimination ($r = .28$, $p = .43$), Detektion und Farbkonstanz ($r = -.44$, $p = .2$) und Diskrimination und Farbkonstanz ($r = -.23$, $p = .52$) auftraten, die ebenfalls nicht bedeutsam waren. Einzig bei den 60 - 70jährigen ergab die Berechnung eine bedeutsame Korrelation bei dem Zusammenhang zwischen Detektion und Farbkonstanz ($r = .9$, $p = .034^*$) im Gegensatz zu Detektion und Diskrimination ($r = .12$, $p = .85$) und Diskrimination und Farbkonstanz ($r = .14$, $p = .82$).

Ebenso zeigt sich in den graphischen Darstellungen (Abbildung 3.1), dass die Punkteverteilung mit Ausnahme des Verhältnisses zwischen Detektion und Farbkonstanz bei 60-70jährigen in Abbildung 3.1 b) keiner bedeutsamen linearen Regression mit vorhersagbarer Steigung folgt.

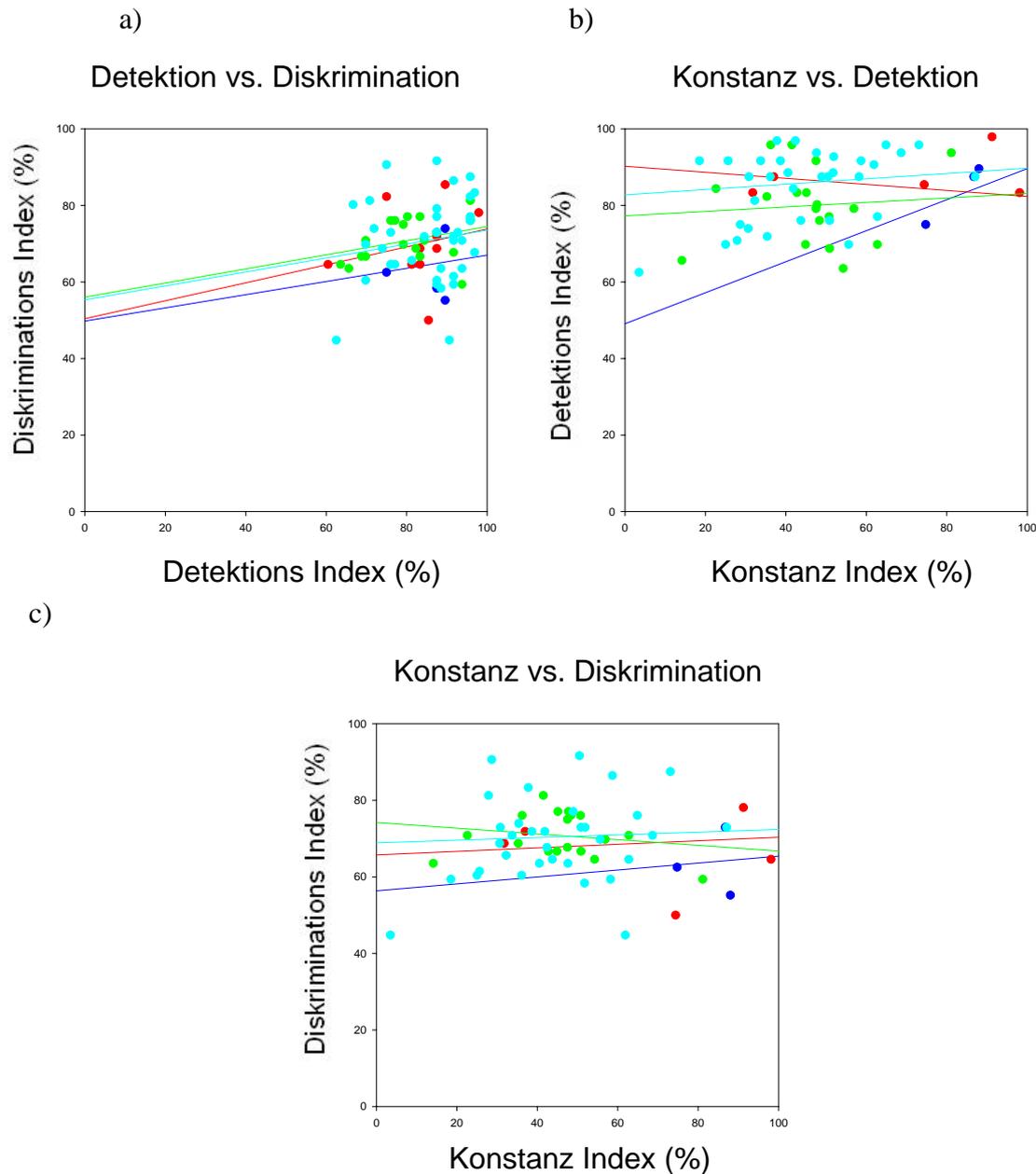


Abbildung 3.1: Graphische Darstellung der Leistungen aller Dekaden (20 - 30 Jahre: Cyan, 40 - 50 Jahre: Grün, 50 - 60 Jahre: Rot, 60 - 70 Jahre: Blau)

a) Detektion vs. Diskrimination, b) Farbkonstanz vs. Detektion, c) Farbkonstanz vs. Diskrimination. Alle Einheiten in Prozent.

Es ist ersichtlich, dass zwischen den Leistungen in den drei verschiedenen Tests kein Zusammenhang besteht. Es lässt sich schlussfolgern, dass hohe Leistungen in einer der drei Aufgaben: Entdecken farbiger Reize, Unterscheiden farbiger Reize und Farbkonstanzleistung nicht einhergehen mit hohen Leistungen in einer der jeweils anderen Aufgabe.

Mittels einfaktorieller Varianzanalyse wurden die Mittelwerte der Leistungen aller Altersgruppen verglichen (Tabelle 3.2). Ein Hinweis auf Unterschiede zwischen den Gruppen findet sich nur bei der Detektionsaufgabe ($p = 0.001^{**}$). Die multiplen Vergleiche (Tabelle 3.3) bestätigen einen bedeutsamen Unterschied zwischen den Detektionsleistungen der 20 - 30jährigen im Vergleich mit den 50 - 60jährigen.

Tabelle 3.2: Varianzanalyse aller Altersgruppen.

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Detektion	Between Groups	2348,047	3	782,682	6,394	,001
	Within Groups	8078,831	66	122,407		
	Total	10426,878	69			
Diskrimination	Between Groups	179,344	3	59,781	,641	,591
	Within Groups	6156,879	66	93,286		
	Total	6336,223	69			
Farbkonstanz	Between Groups	1713,021	3	571,007	1,345	,268
	Within Groups	27171,291	64	424,551		
	Total	28884,312	67			

Tabelle 3.3: Multiple Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) aller Aufgaben und Altersgruppen. * Mittelwertsunterschiede bedeutsam auf 5 %-Niveau.

Dependent Variable	(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Detektion	20-30	40-50	5,18712	3,17941	,645	-3,4612	13,8355
		50-60	15,99678(*)	3,94321	,001	5,2708	26,7228
		60-70	11,82978	5,27158	,169	-2,5095	26,1691
	40-50	50-60	10,80967	4,36360	,095	-1,0598	22,6791
		60-70	6,64267	5,59300	1,000	-8,5709	21,8562
		60-70	-4,16700	6,05986	1,000	-20,6505	12,3165
Diskrimination	20-30	40-50	,05905	2,77557	1,000	-7,4908	7,6089
		50-60	,93805	3,44236	1,000	-8,4255	10,3016
		60-70	6,25005	4,60201	1,000	-6,2679	18,7680
	40-50	50-60	,87900	3,80935	1,000	-9,4828	11,2408
		60-70	6,19100	4,88260	1,000	-7,0902	19,4722
		60-70	5,31200	5,29016	1,000	-9,0778	19,7018
Farbkonstanz	20-30	40-50	-5,07737	5,97631	1,000	-21,3493	11,1946
		50-60	-8,91114	7,38818	1,000	-29,0272	11,2050
		60-70	11,62086	9,85090	1,000	-15,2006	38,4423
	40-50	50-60	-3,83378	8,12658	1,000	-25,9604	18,2928
		60-70	16,69822	10,41616	,683	-11,6623	45,0587
		60-70	20,53200	11,28563	,441	-10,1959	51,2599

Um zu überprüfen, ob sich die Testleistungen in den jeweiligen Schwierigkeitsstufen (Amplituden) der Detektion und Diskrimination unterscheiden, wurde ebenfalls jeweils eine Varianzanalyse für die beiden Aufgaben pro Schwierigkeitsstufe durchgeführt (Tabelle 3.4 & Tabelle 3.6).

Ergebnisse Detektion: Vergleiche zwischen den Gruppen

Die Tabelle 3.4 zeigt die Vergleiche der Ergebnisse der Detektion. Hohe Sättigung der Reize bedeutet, dass die Schwierigkeitsstufe gering war und die Reize bei 50 % Kontrast zum Hintergrund gezeigt wurden. Mit zunehmender, mittlerer Sättigung,

die einem Kontrast von 20 % entsprach, nahm die Schwierigkeit zu, bis sie bei niedriger Sättigung (10 %) der Reize folglich ein hohes Schwierigkeitsniveau erreichte. Die Varianzanalyse entdeckte bedeutsame Unterscheide zwischen den Gruppen bei mittlerer ($p = 0.001^{**}$) und geringer ($p = 0.19^*$) Sättigung.

Tabelle 3.4: Varianzanalyse aller Altersgruppen für die drei Schwierigkeitsstufen bei Detektion.

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Hohe Sättigung 50 %	Between Groups	61,989	3	20,663	2,552	,063
	Within Groups	534,403	66	8,097		
	Total	596,392	69			
Mittlere Sättigung 20 %	Between Groups	4015,505	3	1338,502	6,629	,001
	Within Groups	13325,923	66	201,908		
	Total	17341,428	69			
Geringe Sättigung 10 %	Between Groups	5576,835	3	1858,945	3,541	,019
	Within Groups	34649,251	66	524,989		
	Total	40226,085	69			

Aus der Betrachtung der Post-Hoc-Vergleiche (Tabelle 3.5) ist ersichtlich, dass die bedeutsamen Vergleiche, die in der Varianzanalyse auftauchen aus den Vergleichen zwischen 20 - 30jährigen und 50 - 60jährigen stammen. Die Versuchspersonen zwischen 50 und 60 Jahren sind in ihrer Leistung erheblich schlechter als die Versuchspersonen zwischen 20 und 30 Jahren.

Tabelle 3.5: Multiple Vergleiche (Bonferroni-korrigiert) aller Schwierigkeiten in der Detektionsaufgabe aller Altersgruppen. * Mittelwertsunterschiede bedeutsam auf 5 %-Niveau.

Dependent Variable	(I) Group	(J) Group	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
Hohe Sättigung 50 %	20-30	40-50	1,21886	,81772	,845	-1,0054	3,4432
		50-60	2,33108	1,01417	,148	-,4276	5,0897
	40-50	60-70	2,33108	1,35582	,541	-1,3569	6,0191
		50-60	1,11222	1,12229	1,000	-1,9405	4,1650
		60-70	1,11222	1,43848	1,000	-2,8006	5,0251
50-60	60-70	,00000	1,55856	1,000	-4,2394	4,2394	
Mittlere Sättigung 20 %	20-30	40-50	7,36658	4,08339	,455	-3,7407	18,4738
		50-60	20,42324(*)	5,06436	,001	6,6476	34,1989
	40-50	60-70	16,67324	6,77042	,098	-1,7430	35,0895
		50-60	13,05667	5,60428	,137	-2,1876	28,3009
		60-70	9,30667	7,18322	1,000	-10,2325	28,8458
50-60	60-70	-3,75000	7,78283	1,000	-24,9201	17,4201	
Geringe Sättigung 10 %	20-30	40-50	6,97200	6,58445	1,000	-10,9384	24,8824
		50-60	25,23811(*)	8,16626	,018	3,0250	47,4512
	40-50	60-70	16,48811	10,91726	,814	-13,2080	46,1842
		50-60	18,26611	9,03686	,284	-6,3151	42,8474
		60-70	9,51611	11,58291	1,000	-21,9906	41,0229
50-60	60-70	-8,75000	12,54976	1,000	-42,8867	25,3867	

Im Hinblick auf die deskriptiven Verteilungen der Detektionsaufgabe (Abbildung 3.2) kann gesagt werden, dass die Versuchspersonengruppen im Entdecken farbiger Reize durchweg bessere Leistungen erzielen, desto jünger sie sind. Jedoch führen die zum Teil relativ großen Standardabweichungen dazu, dass diese Unterschiede selten ein bedeutsames Niveau erreichen.

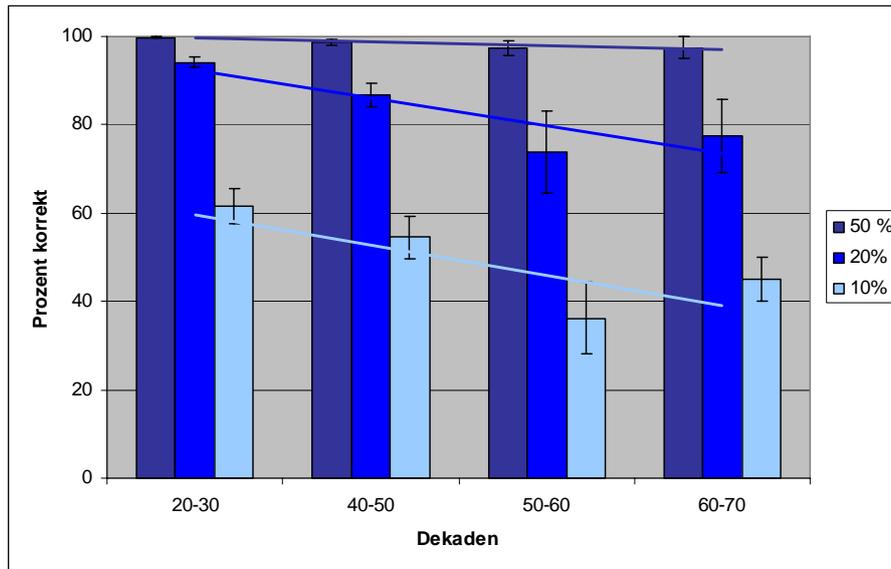


Abbildung 3.2: Mittelwerte und Standardfehler in der Detektionsaufgabe. Es sind die Altersgruppen gegen ihre jeweilige Leistung (Prozent korrekt) aufgetragen. Die Balken zeigen die zunehmenden Schwierigkeiten der Reize (50 %, 20 %, 10 % Sättigung) als Kontrast zum Hintergrund.

Ergebnisse Diskrimination: Vergleiche zwischen den Gruppen

Die Diskriminationsamplituden (Tabelle 3.6) beziehen sich auf den Kontrast zwischen Testfarbe und Vergleichsfarbe und betragen 30 % bei hoher Sättigung, 20 % bei mittlerer und 10 % bei niedriger Sättigung. Hier sind keine Unterschiede zwischen den Stichproben auffällig. Die Betrachtung der Post-Hoc-Vergleiche wird deshalb nicht angeführt.

Tabelle 3.6: Varianzanalyse aller Altersgruppen für die drei Schwierigkeitsstufen bei Diskrimination.

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Hohe Sättigung 30 %	Between Groups	300,433	3	100,144	,996	,400
	Within Groups	6638,830	66	100,588		
Mittlere Sättigung 20 %	Between Groups	114,347	3	38,116	,351	,789
	Within Groups	7172,859	66	108,680		
Geringe Sättigung 10 %	Between Groups	422,395	3	140,798	,975	,410
	Within Groups	9535,676	66	144,480		

Die Testergebnisse in der Diskriminationsaufgabe weisen auf keine bedeutsamen Unterschiede zwischen den Dekaden hin (Abbildung 3.3). Im Gesamtüberblick lässt sich sagen, dass es auch bei der Betrachtung der einzelnen Schwierigkeitsniveaus keine bedeutsamen Unterschiede zwischen den Altersgruppen gibt. Die Balken zeigen die zunehmenden Schwierigkeiten der Reize (30 %, 20 %, 10 %) als Kontrast der Vergleichsfarbe zur Testfarbe.

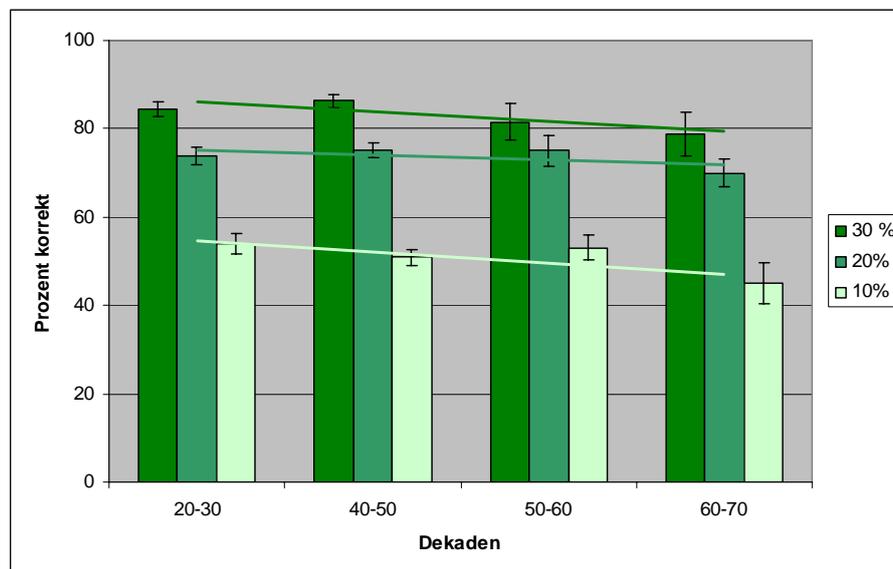


Abbildung 3.3: Mittelwerte und Standardfehler in der Diskriminationsaufgabe. Es sind die Altersgruppen gegen ihre jeweilige Leistung (Prozent korrekt) aufgetragen.

Ergebnisse Detektion und Diskrimination: Vergleiche innerhalb der Gruppen

Nachfolgend wurden mittels eines T-Tests für gepaarte Stichproben die Testleistungen innerhalb der jeweiligen Altersgruppen verglichen, um zu überprüfen, ob sich die Leistungen zwischen den Sättigungsstufen (high, medium, low) bei den beiden Aufgaben (detect, discr) unterscheiden. Die paarweisen Mittelwertsvergleiche (Tabelle 3.7) zeigen, dass bei allen Schwierigkeitsstufen bedeutsame Unterschiede auf 0.05- oder sogar 0.01-Niveau in der Leistung vorliegen. Einzige Ausnahme bildet der Vergleich zwischen hoher und mittlerer Sättigung bei der Detektion bei 60- bis 70jährigen Probanden, die nicht signifikant wird.

Tabelle 3.7: T- Test für gepaarte Stichproben innerhalb aller Altersgruppen; Vergleich zwischen den Schwierigkeiten bei Detektion und Diskrimination

Group			Mean	SD	Std. Error Mean	t	df	Sig. (2- tailed)
20 - 30	Detect	HIGH - MED	5,65784	7,61277	1,25153	4,521	36	,000
	Detect	MED - LOW	32,68514	21,65831	3,56060	9,180	36	,000
	Discr	HIGH - MED	10,64135	7,34491	1,20750	8,813	36	,000
	Discr	MED - LOW	19,84784	10,21125	1,67872	11,823	36	,000
40 - 50	Detect	HIGH - MED	11,80556	11,71916	2,76223	4,274	17	,001
	Detect	MED - LOW	32,29056	14,89018	3,50965	9,201	17	,000
	Discr	HIGH - MED	11,11167	7,20891	1,69916	6,540	17	,000
	Discr	MED - LOW	24,30444	9,00208	2,12181	11,455	17	,000
50 - 60	Detect	HIGH - MED	23,75000	25,98744	8,21795	2,890	9	,018
	Detect	MED - LOW	37,50000	25,68506	8,12233	4,617	9	,001
	Discr	HIGH - MED	6,56200	5,59835	1,77035	3,707	9	,005
	Discr	MED - LOW	21,87400	7,21447	2,28142	9,588	9	,000
60 - 70	Detect	HIGH - MED	20,00000	22,70738	10,15505	1,969	4	,120
	Detect	MED - LOW	32,50000	11,18034	5,00000	6,500	4	,003
	Discr	HIGH - MED	8,75200	6,77738	3,03093	2,888	4	,045
	Discr	MED - LOW	25,00000	7,32664	3,27657	7,630	4	,002

Ergebnisse Farbkonstanz: Vergleiche zwischen den Gruppen

In der Farbkonstanzaufgabe scheint die Leistung mit zunehmendem Alter abzunehmen und breiter zu streuen (Abbildung 3.4). In der Varianzanalyse zeigen sich durch den mit dem Alter zunehmenden Standardfehler keine Unterschiede zwischen den Altersstufen (Tabelle 3.8).

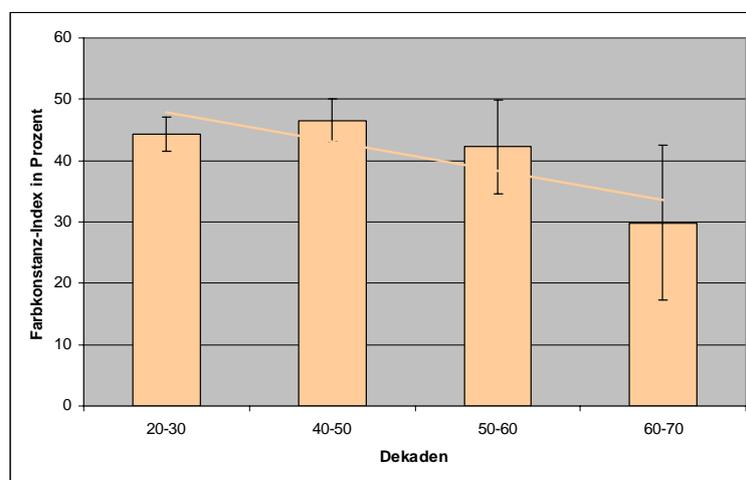


Abbildung 3.4: Deskription aller Altersgruppen für die Konstanzaufgabe

Tabelle 3.8: Varianzanalyse aller Altersgruppen für die Konstanzaufgabe

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1713,021	3	571,007	1,345	,268
Within Groups	27171,291	64	424,551		
Total	28884,312	67			

Die Betrachtung der einzelnen Teilleistungen für Farbkonstanz auf rot-grüne Reize und blau-gelbe Reize zeigt, dass die Leistungen nicht gleichermaßen anwachsen. Hohe Leistungen in rot-grüner Farbkonstanz bringen nicht automatisch hohe Leistungen in blau-gelber Farbkonstanz mit sich (Abbildung 3.5). Dieses Verhältnis, das in

Steigungen unter 1 zum Ausdruck gebracht wird, zeigt sich einheitlich über alle Altersgruppen. Ebenso entstehen auch keine bedeutsamen Korrelationen (Tabelle 3.9) zwischen den erbrachten Leistungen in der Farbkonstanz Rot-Grün und Blau-Gelb.

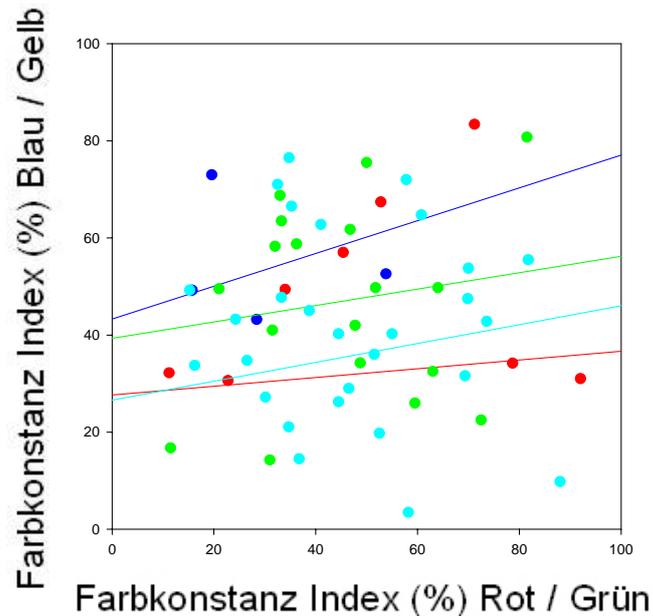


Abbildung 3.5: Farbkonstanzindex für Rot-Grün (Abszisse) als Funktion des Farbkonstanzindex für Blau-Gelb (Ordinate). Alle Einheiten in Prozent. (20-30 Jahre: Cyan, 40-50 Jahre: Grün, 50-60 Jahre: Rot, 60-70 Jahre: Blau)

Tabelle 3.9: Pearson Produkt-Moment-Korrelation zwischen Farbkonstanzindex Rot-Grün vs. Farbkonstanzindex Blau-Gelb

Alter	20-30	40-50	50-60	60-70
Korrelation	,242	,156	,065	,362
Signifikanz (2-seitig)	,161	,537	,859	,549
N	35	18	10	5

Beschreibung der Kategorisierungsergebnisse

Die getesteten Kategorisierungsleistungen dienen der deskriptiven Darstellung und sind nachfolgend in Kreisdiagrammen dargestellt, die die Grenzen zwischen den Kategorien bei den drei Sättigungsstufen zeigen. Es ist anzunehmen, dass die Versuchspersonen mit abnehmender Sättigung zu der Wahl von Zwischenfarben tendieren, während stärker gesättigte Farben mit mehr Bestimmtheit den Hauptkategorien „Rot“, „Grün“, „Gelb“ und „Blau“ zugeordnet werden.

Die Antworten der Versuchspersonen bildeten Verteilungen um einen Modalwert, der im Folgenden als Antwort dargestellt wird. Die Grenzen verlaufen zwischen den 16 Farbtönen (Abbildung 3.6), die für diesen Test dem DKL-Raum entnommen wurden (Vergleiche: Testbatterie für verschiedenen Teilleistungen der Farbwahrnehmung -Kategorisierung – Benennen farbiger Reize).

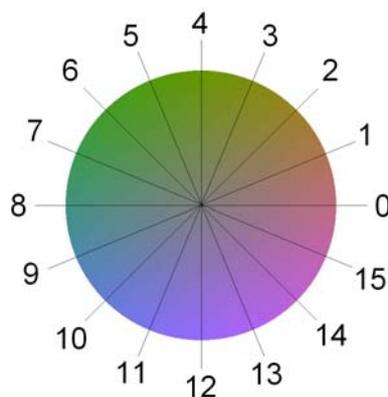


Abbildung 3.6: Verwendete Farben des DKL- Farbraums und ihre Nummerierung.

Bei Betrachtung der Abbildung 3.6 wird ersichtlich (im Rahmen der drucktechnischen Möglichkeiten), dass der Gelbbereich bei 2 und 3 relativ klein ist, während der Blau/Violett-Bereich zwischen 8 und 14 relativ groß ist. Also sind hier von

Kategorisierung der 40-50 jährigen.

Die Bereiche „Rot“, „Rot-Blau“ und „Blau“ zeigen relativ wenig Veränderung über die verschiedenen Sättigungen (Abbildung 3.8). Die „Grün-Blau“-Kategorie wird nur bei höchster Sättigung und nur für einen Stimulus vergeben. Erstaunlicherweise hält sich der „Gelb“-Bereich über die erschiedenen Sättigungen und nimmt sogar bei nur 10 % Kontrast an Fläche zu.

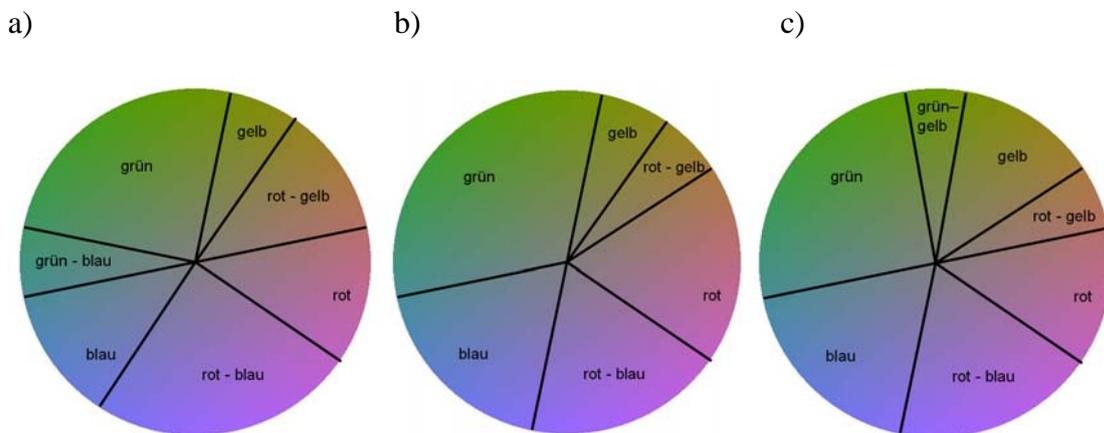


Abbildung 3.8: Grenzen zwischen den Farbkategorien bei der Stichprobe der 40 – 50 jährigen bei 50 % Sättigung (a), 20 % Sättigung (b) und 10 % Sättigung (c).

Kategorisierung der 50 - 60 jährigen.

Als besonders stabil zeigen sich in Abbildung 3.9 die Kategorien „Grün“, „Blau“ und „Rot-Blau“. Das anfänglich nur bei einem Reiz gebrauchte „Grün-Gelb“ breitet sich mit abnehmender Sättigung immer mehr aus.

Diskussion

Innerhalb der verschiedenen Stichproben ist zu erkennen, dass die Ergebnisse in Farbdetektion, Farbdiskrimination und der Farbkonstanz nicht miteinander korrelieren. Es kann gefolgert werden, dass hohe Ergebnisse in einem der Tests nicht zu hohen Ergebnissen in einem anderen führen. Die Leistungen Entdecken, Unterscheiden und Konstanzwahrnehmung können also als getrennt voneinander betrachtet werden.

Im Vergleich über die Altersstichproben zeigen sich unterschiedliche Mittelwerte bei der Detektionsaufgabe, die aber nur in wenigen Vergleichen aufgrund der großen Standardabweichungen bedeutsam werden.

Es sind keine Unterschiede in den Diskriminations-Leistungen zu finden. Im paarweisen Vergleich zwischen den Schwierigkeitsstufen werden die unterschiedlichen Leistungen fast jedes Mal signifikant. Innerhalb jeder Gruppe nehmen die Leistungen von einer Schwierigkeitsstufe zur nächsten deutlich ab. Die gewählten Abstände der Schwierigkeitsstufen für die Konstanzmethode sind als brauchbare Abstufung zu betrachten.

Die Konstanzaufgabe zeigt abnehmende Konstanzleistung mit zunehmendem Alter. Bedeutsam werden diese Unterschiede in der Varianzanalyse jedoch nicht. Hohe Werte in Farbkonstanz „Blau-Gelb“ führen bei keiner der Altersgruppen zu hohen Werten in der Farbkonstanz „Rot-Grün“ und vice versa.

In der Kategorisierungsaufgabe zeigt sich, dass auf den Hauptachsen des DKL-Raumes nur die L-M-Achse durchgehend mit „Rot“ und überwiegend mit „Grün“ bezeichnet wird. Auf der S-(L+M)-Achse werden Namen aus den Zwischenbereichen verwendet. Das DKL-Gelb wird kategorisiert als Gelb-Grün und das DKL-Blau als Blau-Rot. Da wir durch unsere Vorerfahrung mit den Farbnamen eher prototypische

Farben verbinden, sind diese Pastelltöne für die Wahrnehmung der Probanden ungewohnt und führen zu Zwischenantworten.

Bei gesunden Probanden ließe sich das Antwortverhalten prüfen, dass sich ergäbe, wenn die Tastatur nicht mit prototypischen, sondern mit DKL-Farben kodiert wäre. Die Farben müssten dann nicht benannt werden, sondern die Versuchsperson könnte sich einfach bei der Einordnung an den gegebenen „Landmarken“ oder „Ecksteinen“ orientieren. Dieses Verfahren wäre aber nicht adaptierbar für die Patienten, denen die Tastaturbedienung eine zusätzliche, unzumutbare Last wäre. Es ließe sich eher ein Medium entwickeln, das die wählbaren Farben trägt, auf die die Patienten statt einer verbalen Antworten deuten sollen. Dieser Träger müsste allerdings wieder beleuchtet sein, da er im abgedunkelten Raum nicht sichtbar wäre. Eine Farbpalette ließe sich auf dem Monitor anzeigen, aber die Aufgabe würde dadurch ihren Charakter als Farbbenennung oder –kategorisierung verlieren und Komponenten wie Matching, Unterscheidung und Farbgedächtnis in sich aufnehmen.

4. Klinische Stichprobe

Kontaktaufnahme mit der Klinik

Zur Gewinnung einer klinischen Stichprobe bemühten wir uns um Kontakt zu der nahegelegenen Fachklinik für Neurologie und Rehabilitation in Braunfels / Hessen. Die Neurologische Klinik Braunfels ist eine Fachklinik für Neurologie mit neuro-orthopädischem Fachbereich. Diese Klinik verfügt über 25 neurologische Akutbetten, 30 Betten für neurologische Frührehabilitation (Phase B), 50 Betten für weiterführende Rehabilitation (Phase C) und 95 Betten für Anschlussheilbehandlung und Heilverfahren. Neben allen akuten und postakuten neurologischen Krankheitsbildern werden auch neuro-orthopädische Patienten behandelt. Besondere Spezialisierung liegt für Patienten mit folgenden Störungsbildern vor:

- vaskulär bedingte Schädigungen des Zentralnervensystems ZNS (nach Hirninfarkten, Hirnblutungen, Hirnembolien oder nach Gefäßoperationen im ZNS)
- entzündliche und metabolische Störungen des ZNS und der peripheren Nerven
- Zustand nach operativen Eingriffen am ZNS (raumfordernde Prozesse an Rückenmark und Gehirn)
- neurologische Störungen bei degenerativen Erkrankungen der Wirbelsäule
- Zustand nach Bandscheiben- und Wirbelsäulenoperationen
- Zustand nach Schädelhirntraumen aller Schweregrade einschließlich multilokaler Schädigungen des ZNS und Polytraumatisierung sowie in bestimmten Fällen nach hypoxischer Hirnschädigung
- degenerative und extrapyramidalmotorische Erkrankungen

In einem persönlichen Gespräch mit der ärztlichen Leitung der Klinik vereinbarten wir die Konditionen. In einem Brief an die Oberärzte der Stationen (Anhang H) baten wir um Unterstützung und Kooperation. Falls auf den Station Patienten untergebracht wären, die für die Teilnahme an unserer Studie durch Instruktionsverständnis und Belastbarkeit geeignet schienen, so baten wir darum, durch Rücksprache mit den Patienten deren prinzipielle Teilnahmebereitschaft zu klären und uns im Rahmen des Datenschutzgesetzes den Kontakt zu ermöglichen.

Ethikantrag

Vor Anbeginn dieser Studie wurde an die Ethikkommission der Justus-Liebig-Universität Giessen ein Genehmigungsantrag gestellt (Anhang I). Die Kommission legt ihrer Arbeit die vom 18. Weltärztekongress 1964 in Helsinki gebilligte und zuletzt vom 41. Weltärztekongress 1989 in Hongkong abgeänderte Erklärung in der jeweils geltenden Fassung zugrunde. Diese Studie wurde am 17.02.2005 von der Ethik-Kommission in Giessen genehmigt.

Einschlusskriterien für die Patientenstudie

Um die Auswahl der geeigneten Patienten zu erleichtern, gaben wir den Oberärzten und Neuropsychologen einen Kriterienkatalog an die Hand (Anhang J). Für unsere Studie kamen nur Patienten mit umschriebenen kortikalen Läsionen in Betracht. Diese Schädigungen durften occipito-parietal oder occipito-temporal sein und bi- oder unilateral. Ätiologisch interessant waren für uns besonders embolische oder hämorrhagische Infarkte und abgrenzbare Tumore. Eine Ausnahme, die wir auch bereit waren in die Studie aufzunehmen, waren Patienten mit hypoxischer Hirnschädigung, die

zwar nicht streng abgrenzbar, aber dafür bilateral ist. Ein Patient mit dieser Störungsursache war zur Zeit unserer Untersuchung nicht für unsere Studie verfügbar. Aufgrund der offenen Fragen zur Plastizität der visuellen Wahrnehmung waren für uns sowohl frische Schädigungen als auch länger zurückliegende von Interesse. Wir nahmen daher keine Einschränkungen bezüglich des Zeitpunktes der Schädigung vor. Der Alters-Range wurde von uns 16 bis 80 Jahre angegeben, was ebenfalls nahezu keine Einschränkung darstellt. Die Bedienung der Eingabetastatur war für eine unserer Aufgaben Voraussetzung. Das Instruktionsverständnis musste gegeben sein, Antworten konnten von schwer aphasischen Patienten aber auch nonverbal gegeben werden. Das allgemeine Aufmerksamkeits- und Belastbarkeitsniveau musste eine Mitarbeit über mindestens 30 Minuten erlauben. Weitere neurologische Symptome waren vorerst keine Ausschlusskriterien und wurden in unserer Voruntersuchung eingehender betrachtet. Ob eine eventuelle Eignung für unsere Testbatterie vorlag, konnten wir in der ersten Untersuchungssitzung klären.

Patientenkontakt

Die Patienten wurden uns nach ihrem Einverständnis namentlich von den Oberärzten oder den Neuropsychologen vorgeschlagen. Innerhalb des stationären Aufenthaltes durften wir die Patienten durch die Therapieplanung der Klinik koordinieren lassen. Wir baten die Therapieplanung, für jeden Patienten erst mal einen Termin für die Voruntersuchung in den Zeitplan des Patienten aufzunehmen. Unsere Diagnostik wurde den therapeutischen Anwendungen der Klinik untergeordnet. Dadurch ergaben sich für uns meist Untersuchungszeiten in den Nachmittagsstunden. Die Patienten erhielten einen Aufklärungsbogen (Anhang K), der ihnen Ziel und Zweck unserer Studie sowie die Konditionen für freiwillige Teilnahme und Möglichkeit zum

Abbruch erklärte. Die Patienten wurden über die Inhalte mündlich aufgeklärt und bekamen alle offenstehenden Fragen beantwortet. Weiterhin wurden die Patienten über Anonymität der Daten und Publikationsrecht informiert, entbanden uns gegenüber der Arbeitsgruppe von der Schweigepflicht und gewährten uns Akteneinsicht in Bildgebung und Befund. Nach der Entlassung durften die Patienten wählen, ob wir sie privat anschreiben durften oder ob kein weiterer Kontakt gewünscht war.

Wenn der Patient sich bereit erklärte, die Einverständniserklärung zur Teilnahme zu unterschreiben (Anhang L), wurde die Voruntersuchung durchgeführt. In der ersten Untersuchungssitzung wurden basale Funktionen des Sehens auf ihre Funktion geprüft (siehe unten: Voruntersuchung). Die Befunde und Ergebnisse wurden zeitnah zusammengestellt und der behandelnden Ärztin beziehungsweise dem behandelnden Arzt zur Verfügung gestellt.

Schnitt der Patient gemäß den festgesetzten Kriterien gut ab, so wurden weitere Untersuchungstermine geplant. In einer oder zwei weiteren Sitzungen wurden dann die Experimente zur Farbwahrnehmung durchgeführt. Die Untersuchungssitzungen waren auf maximal 60 Minuten ausgelegt. Je nach allgemeiner Belastbarkeit des Patienten waren eventuell mehrere Termine von kürzerer Dauer sinnvoll.

Versuchsaufbau

Mobiles Labor

Für unsere Untersuchungen an den Patienten errichteten wir in der Klinik ein mobiles Labor. Ein rollbarer Tisch aus Aluminiumprofilen (Abbildung 4.1) bildete die Basis für unsere Untersuchungsgeräte. Das Perimeter auf der einen Seite hatte eine

eigene elektronisch verstellbare Kinnstütze. Auf der gegenüberliegenden Seite des Tisches stand der Monitor.



Abbildung 4.1: Rollbarer Tisch als Basis für unsere Untersuchungsgeräte.

Um für alle Patienten einen konstanten Abstand von 60 cm zum Bildschirm sicherzustellen, verwendeten wir einen ausziehbare und höhenverstellbare Kinnstütze (Abbildung 4.2). Die Kinnschale war eine leicht zu desinfizierende Vorrichtung aus Kunststoff.



Abbildung 4.2: Verstellbare Kinnstütze und Tastaturablage am Tisch. Abstand der Augen zum Monitor betrug 60 cm.

Die Tastatur- und Armablage war in Schienen geführt und konnte für Linkshänder ummontiert werden. Die Tastatur war eigens für Patienten angefertigt. Hierbei wurde auf Leichtgängigkeit der Tasten ebenso geachtet, wie auf ein rückmeldendes Klickgeräusch und ausreichenden Abstand zwischen den Tasten für motorisch beeinträchtigte Patienten.

Außerhalb der Messungen durften wir unseren Untersuchungsaufbau in einem abschließbaren Raum für Testmaterial und Gerät der Klinik unterstellen. Der Zugriff durch unberechtigte Personen wurde so vermieden. Die digitalen Daten aus der Perimetrie und unseren eigenen Untersuchungen sowie die Fragebögen und Notizen wurden direkt an jedem Untersuchungstag in die Universität überführt und dort unter Verschluss archiviert.

Monitor und Rechner

Die Versuchspersonen absolvierten die Tests an einem iiyama VisionMaster 19“ Bildschirm. Die Bildwiederholungsrate betrug 85 Hz. Die rechteckige Präsentationsfläche maß 38,0 cm horizontal und 29,0 cm vertikal. Die Reizfläche entsprach einer Breite von 32,3 Grad Sehwinkel und einer Höhe von 25,8 Grad Sehwinkel. Die Einstellung am Monitor war 100 % Kontrast, 70 % Helligkeit und eine Farbtemperatur von 9300 Kelvin. Der Monitor wurde mittels Spektroradiometers vermessen und Gamma-korrigiert (Golz et al., 2003).

Im Labor wie in der Klinik geschah die Präsentation unter Steuerung eines Intell ® Pentium ® Prozessor mit 1.60 GHz und 512 MB RAM. Der Laptop, den wir mit zur Klinik nahmen, war ein Dell Latitude 600, Betriebssystem Windows XP Professional.

Teilnehmer

Im Zeitraum vom 01. Februar 2005 bis zum 31. August 2006 untersuchten wir 56 Patienten mit den Vortests auf Eignung für weitere Untersuchungen mittels der Farbtest-Batterie. Davon blieben nach Ausschluss durch den Kriterienkatalog 28 Patienten für die klinische Stichprobe. Die Probe umfasste 16 Männer und zwölf Frauen im Alter von 22 bis 84 Jahren ($M= 54.4$, $SD= 15.8$). Das Bildungsniveau reichte von der Hauptschule bis zum Universitätsstudium. Bis auf einen Linkshänder und einen Beidhänder waren alle Versuchspersonen Rechtshänder. Detaillierte statistische Angaben sind dem Anhang M zu entnehmen. Das Läsions-Test-Intervall, das heißt die Dauer zwischen dem klinischen Vorfall und unserer Untersuchung betrug zwischen einem und 84 Monaten. Die Diagnosen, neurologischen Auffälligkeiten und weitere klinische Details der Patientenstichprobe sind dem Anhang N zu entnehmen.

Kriterien der Voruntersuchung

Die Voruntersuchung diente der Auswahl geeigneter Versuchspersonen für die Folgeuntersuchungen zu Teilleistungen des Farbensehens. Der Entscheidung lag folgender Kriterienkatalog zugrunde:

- Anamnese: keine Vorgeschichte mit unbehandelten Augenerkrankung, wie zum Beispiel grauer Star (Katarakt), grüner Star (Glaukom) oder sonstige operationsbedürftigen Augenerkrankungen
- Sehschärfe: Visus von mindestens 0.8, auch mit Korrektur
- Stereosehen: kein Ausschlusskriterium, deskriptive Erhebung
- Farbsehen: kein Ausschlusskriterium, deskriptive Erhebung

- Kontrastsehen: Logarithmische Kontrast-Sensitivität mindestens 1.50
- Händigkeitsfragebogen: kein Ausschlusskriterium, deskriptive Erhebung
- EKN-Fragebogen: kein Ausschlusskriterium, deskriptive Erhebung
- Neglect-Test (Mesulam): Verteilung der Auslassungen sollte keinen Hinweis auf eine einseitige Vernachlässigung ergeben; Anzahl der Auslassungen (links/rechts) sollte den altersgemäßen Erwartungen entsprechen
- Neglect-Test (Linienhalbieren): Schätzung des Mittelpunktes sollte keinen Hinweis auf eine einseitige Vernachlässigung ergeben
- Gesichtsfeldmessung: Quadranten- oder Hemianopsien sind kein Ausschlusskriterium, deskriptive Erhebung
- Fähigkeit zur selbstständigen Augenfixation (Kontrolle per Kamera im Perimeter, visuelle Kontrolle)

Eine tabellarische Übersicht über alle Patienten und deren Ergebnisse der einzelnen Vortests zeigt der Anhang O. Andererseits gab es auch Fälle, in denen eine Entscheidung gegen die Teilnahme einzelner potentieller Versuchspersonen aus organisatorischen Gründen gefällt wurde. Hierzu wurden Kooperationsbereitschaft, Belastbarkeit und Instruktionsverständnis abgewogen.

Durchführung

Die Versuchspersonen durchliefen in diesem Experiment die Aufgaben Detektion, Diskrimination, Kategorisierung und Farbkonstanz (Hintergrund-Illusion und Transparenzaufgabe). Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Testaufgaben finden sich oben. Für die Voruntersuchung wurde eine einstündige Sitzung eingeplant.

Für die Farbttests wurden eine oder zwei weitere einstündige Sitzungen mit der Therapieplanung der Klinik vereinbart.

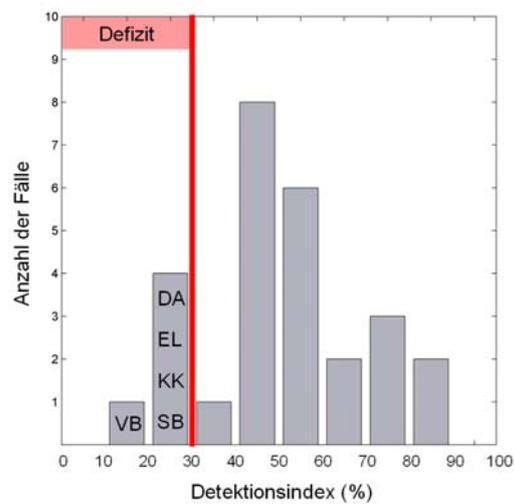
Ergebnisse

Die Ergebnisse werden im Folgenden zwar im Überblick dargestellt, doch sollte in Betracht gezogen werden, dass diese Versuchspersonenstichprobe keine homogene Gruppe ist. Vielmehr besitzt jeder Patient eine eigene neurologische Krankheitsgeschichte mit individuell unterschiedlichen Konsequenzen für die subjektive Wahrnehmung. Deshalb folgen den generellen Vergleichen Einzelfallbeschreibungen der Patienten, die auffällige Ergebnisse zeigten.

Ergebnisse der Patientenstichprobe in Detektion, Diskrimination, Kategorisierung und Farbkonstanz

Vergleicht man die Ergebnisse der Patienten in der Detektionsaufgabe mit der altersbezogenen Normstichprobe, die $M = 69.2$ mit einem $SD = 17.14$ erreicht, so sind alle Ergebnisse, die unterhalb von zwei Standardabweichungen liegen, als defizitär zu betrachten. Für die Verteilung der Patienten bedeutet das, dass alle, die links der roten Linie liegen, beeinträchtigt sind (Abbildung 4.3 a). Dies betrifft die Patienten VB, SB, KK, EL und DA. Ebenso wurden die Diskriminations-Leistungen der Patienten mit der Normstichprobe ($M = 69.9$, $SD = 10.27$) verglichen (Abbildung 4.3 b), wodurch alle Ergebnisse, die unterhalb des Minimums (49.36 %) liegen, als Beeinträchtigung anzusehen sind. Ein Ausfall der Diskriminationsleistung trifft auf zehn Patienten (MR, VB, DH, EL, KK, JP, GW, SB, JH, GL) zu. Diese Ausfälle sind in der Tabelle 4.1 mit einem Plus markiert.

a) Detektion



b) Diskrimination

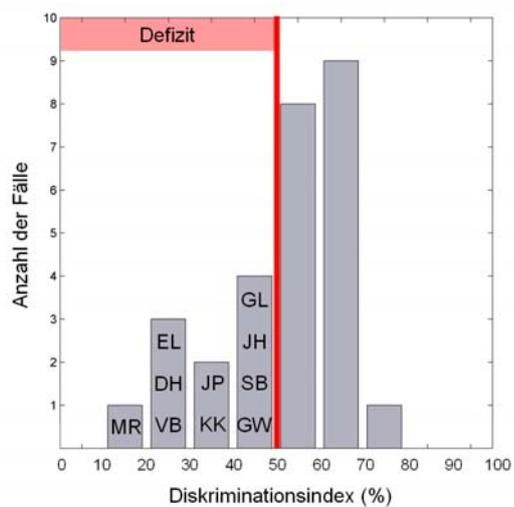


Abbildung 4.3: Histogramme von 28 Patienten. Dargestellt ist die Anzahl der Leistungen in a) Detektion und b) Diskrimination geclustert in Dekaden. Verglichen mit der Normstichprobe sind die Ergebnisse links der roten Linie defizitär.

In der Gegenüberstellung von Entdecken und Unterscheiden gibt es vier Patienten, bei denen sowohl die eine als auch die andere Leistung eingeschränkt ist. Betroffen sind dabei die Patienten VB, KK, SB und EL.

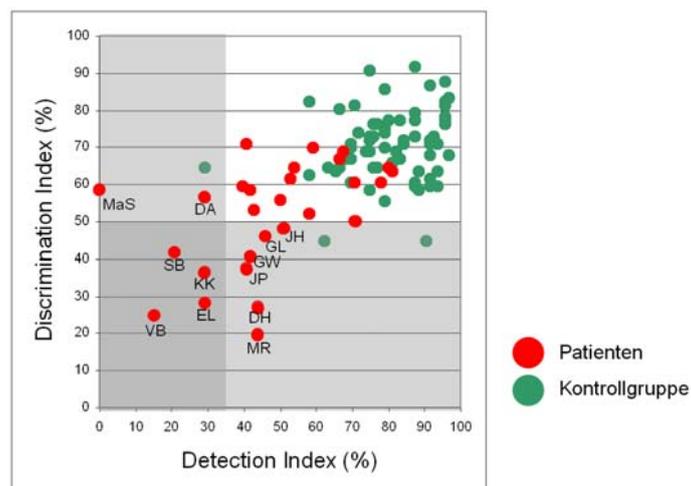


Abbildung 4.4: Scatterplot der Leistungen aller Patienten in Detektion (Abszisse) und Diskrimination (Ordinate) in Prozent. Die grau schattierten Bereiche kennzeichnen die Defizite. Die vier Patienten im dunkelgrauen Bereich haben Einschränkungen in beiden Aufgaben. Rot: Patienten, Grün: Kontrollstichprobe.

Um Defizite in der Benennungsaufgabe zu erfassen, mussten der von den Versuchspersonen gegebenen Antwort ein Label „richtig“ oder „falsch“ zugewiesen werden. Die Antwort der Patienten war dann richtig, wenn sie in die gleiche Kategorie fiel, die von der Vergleichstichprobe vorgegeben war. Um leichte Abweichungen zu tolerieren, wurde die jeweils danebenliegende Kategorie ebenfalls als richtig beurteilt. In unserer Auswertung wurde folglich eine Farbe, die von der Normstichprobe als rot eingestuft wurde, dann als richtig beurteilt, wenn der Patient eines der Urteile „Rot-Gelb“, „Rot“ oder „Rot-Blau“ abgab. Dieses Kriterium kann als großzügig betrachtet werden, da in einigen Fällen die Antwort „Rot-Blau“ für bis zu 180° Azimuth der Farbebene richtig war. Trotzdem hat sich bei der Kategorisierungsleistung gezeigt, dass bei einem überwiegenden Teil der Patienten ein oder zwei Benennungen falsch waren. Um gegenüber dieser Mehrheit der Patienten eine differenzierte Aussage zu treffen, wurde das Kriterium für falsche Benennungen auf vier festgelegt. Tabelle 4.1 protokolliert in der Spalte „Kategorisierung“ ein Defizit, wenn einer der drei Werte für 50 %, 20 % und 10 % Sättigung vier fehlerhafte Benennungen aufweist.

Die Ergebnisse der beiden Konstanzaufgaben wurden jeweils mit der altersgematchten Stichprobe verglichen. Unterschieden sich die Ergebnisse von Patient und Vergleichsstichprobe, so wurde die Einstellung bzw. Auswahl als fehlerhaft markiert. In der Tabelle 4.1 bedeutet ein Kreuz in der Spalte „Konstanz“, dass sowohl die Antworten auf rot-grüne als auch auf blau-gelbe Reize fehlerhaft war. War nur ein Teil der Aufgabe fehlerhaft, so zeigt die Tabelle die beeinträchtigte Farbkategorie (R/G für rot/grün und B/Y für blau/gelb).

Aus der Läsionsanalyse wurden drei Patienten herausgenommen, die von einer Erkrankung mit diffusen Grenzlinien zum angrenzenden Gewebe betroffen waren. Hierzu zählen alle Arten von Tumoren (Meningiom, Oligoastrozytom). Zwei Patienten

waren von multiplen subkortikalen Läsionen betroffen, die einen Vergleich zwischen den diffusen Läsionsorten und ihren Leistungseinbußen unmöglich machten. Ebenso schlossen wir einen Patienten mit chronischer Subarachnoidalblutung aus und konzentrierten uns auf die akut aufgetretenen Fälle. Demnach blieben 22 Patienten (13 Männer und neun Frauen), deren Ergebnisse ausgewertet wurden.

Tabelle 4.1: Defizite in der Farbwahrnehmung und Läsionen

Defizite sind durch ein Plus kenntlich gemacht oder zeigen die beeinträchtigte Farbdimension (R/G oder B/Y). Hervorgehoben sind korrespondierende Beeinträchtigungen zwischen Detektion und Diskrimination (rot), Kategorisierung und Diskrimination (grün), Diskrimination allein (gelb) und Konstanz (blau).

Fall	Detekt.	Diskrim.	Kateg.	Konst.	Diagnose
AB				+	ICB re. occ.
AS				R/G	ACM li.
CS					Schlaganfall ACM li.
DH		+			Schlaganfall re.
EL	+	+	+		Schlaganfall ACP re.
GW		+	+		Schlaganfall ACM re.
HP				+	Schlaganfall ACP re.
JH		+			ICB li. par.
JP		+	+		SAB, Aneurysma, ACM re.
KE					ICB
KK	+	+		B/Y	Schlaganfall ACM & ACP re.
KN				R/G	SAB nach Aneurysmablutung
LL					ACM li.
MR		+	+	+	Schlaganfall ACM re.
MaS				B/Y	Thalamusblutung li.
MoS					SAB, ACM li,
PK					SAB aus ACM Aneurysma
SB	+	+	+		ICB re. par.
UW					SAB re., Aneurysma
VB	+	+			Schlaganfall ACP re.
WH				B/Y	Schlaganfall ACM li.
WR					Schlaganfall re. par.

Darstellung der Patientenfälle

Im Folgenden werden 15 Fälle vorgestellt, die gemäß unserer Einschätzung eine Beeinträchtigung in einer der untersuchten Teilleistungen aufweisen. Bei mehreren vorliegenden Bildgebungen verschiedener Zeitpunkte verwendeten wir jeweils die letzte Aufnahme vor unserer Untersuchung. Die gewählten Bilder stellen exemplarische Abbildungen dar. Gemäß radiologischer Konvention sind die Abbildungen gegenüber dem alltagsüblichen Sprachgebrauch rechts-links vertauscht. Zur graphischen Darstellung verwendeten wir die Software „MRIcro“ von Rorden (2001) und wählten zur Darstellung den MNI Space (Montreal Neurological Institute). Die Läsionsanalysen werden dargestellt in der horizontalen Schnittebene, da uns nur diese von allen Patienten vorlag. Coronare oder transversale Schnitte standen uns nur in Einzelfällen zur Verfügung und werden jeweils bei den entsprechenden Patienten im Original abgebildet. Die Leistungen in den einzelnen Aufgaben sind in den Abbildungen von a) bis d) zu finden. Die Darstellung von a) Detektionsleistung und b) Diskriminationsleistung ist jeweils aufgeteilt in die vier Quadranten des Gesichtsfeldes. Die Balken zeigen die Leistung des Patienten für die drei Sättigungsstufen, wohingegen die Linien die erwarteten Ergebnisse eines altersgleichen Probanden aus der Normierungsstichprobe darstellen. Die Linien werden standardmäßig schwarz dargestellt. Sie werden jedoch rot abgebildet, wenn die Unterschiede zwischen Patient und Vergleichsstichprobe signifikant werden. Die Kategorisierungsergebnisse (c) werden ebenfalls für die drei Sättigungsstufen dargestellt. Die Anordnung entspricht der isoluminaten DKL-Ebene, mit horizontaler L-M-Achse und vertikaler S-(L+M)-Achse. Die Farbe der Vektoren stellt die jeweilige Antwort des Patienten dar. Im Fall dessen, dass der Patient die Antwort verweigerte, wird der Pfeil grau dargestellt. Antworten außerhalb der Toleranz werden mit einem „X“ markiert und die Anzahl der

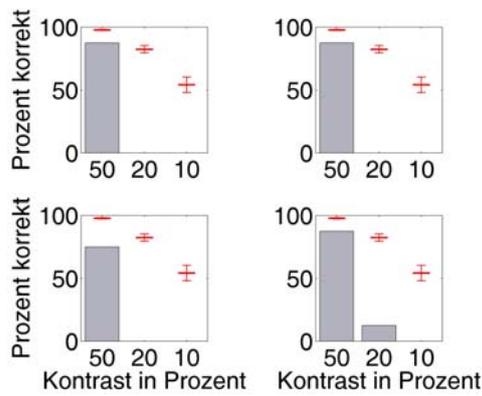
Fehler unter dem jeweiligen Diagramm dargestellt. In der Darstellung d) zur Farbkonstanz sind links die Ergebnisse für die Hintergrundillusion und rechts für die Transparenzaufgabe (sofern durchgeführt) abgebildet. Der rote Balken stellt die Ergebnisse für L- und M-Zapfen dar, der blaue für S-Zapfen. Der antrazithfarbene Balken bildet aus beiden nur einen Mittelwert. Die roten und schwarzen Linen stellen wiederum die Vergleichsstichprobe dar.

Leistungsdefizite in Detektion und Diskrimination

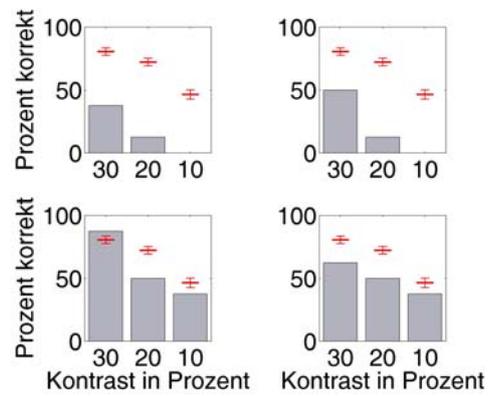
Patient KK.

Der Patient war verheiratet und hatte zwei Kinder. Er schloss die Schule mit dem Hauptschulabschluss ab und arbeitete zuerst als Schreiner und später in der Werbungsbranche. Zum Zeitpunkt der Untersuchung war er 74 Jahre alt. Es wurde die Diagnose einer Grenzzonenischämie im Bereich der Arteria cerebri media (ACM) und Arteria cerebri posterior (ACP) rechts gestellt (Abbildung 4.5). Die Erkrankung lag zehn Monate zurück. Die neurologischen Defizite machten sich bemerkbar in einer Feinmotorikstörung der linken Hand, leichten Gangstörung und einer leichten Dysarthrie. Das Gesichtsfeld war unbeeinträchtigt. Er hatte auffällige Defizite in Detektion, Diskrimination und bei den blau/gelben Reizen der Farbkonstanzaufgabe.

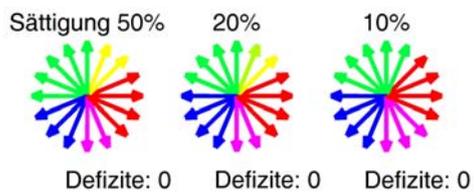
a)



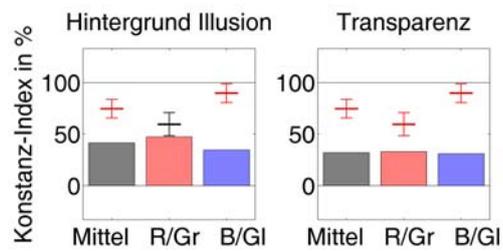
b)



c)



d)



e)

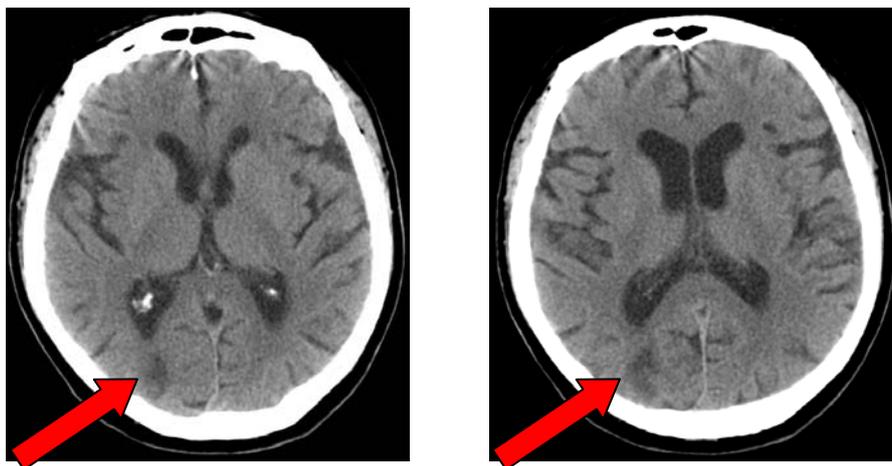
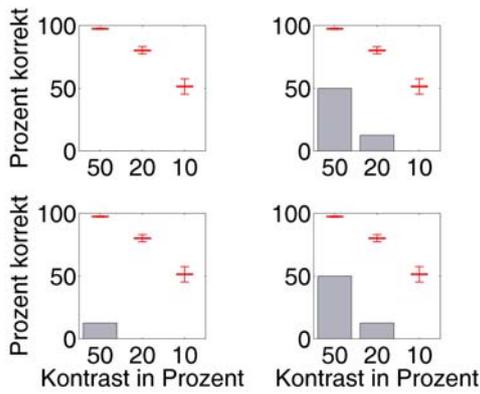


Abbildung 4.5: Patient KK. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: Grenzzonenischämie im Bereich ACM und ACP.

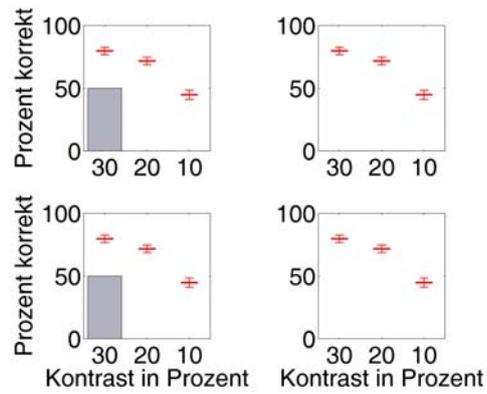
Patientin VB.

Die Patientin war verwitwet und Mutter von sieben Kindern. Zum Zeitpunkt der Untersuchung war sie 84 Jahre alt. Sie schloss die Hauptschule ab und arbeitete zuletzt als Sekretärin im Gesundheitswesen. Ihre Diagnose lautete: Hirninfarkt, ACP rechts (Abbildung 4.6). Bemerkbar machten sich Doppelbilder in der Anfangszeit, mnestische Defizite, eine Quadrantenanopsie oben links und eine motorische Aphasie. Diese Patientin hatte auffällige Defizite in Detektion und Diskrimination

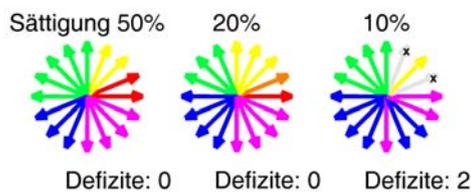
a)



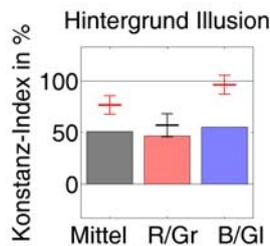
b)



c)



d)



e)

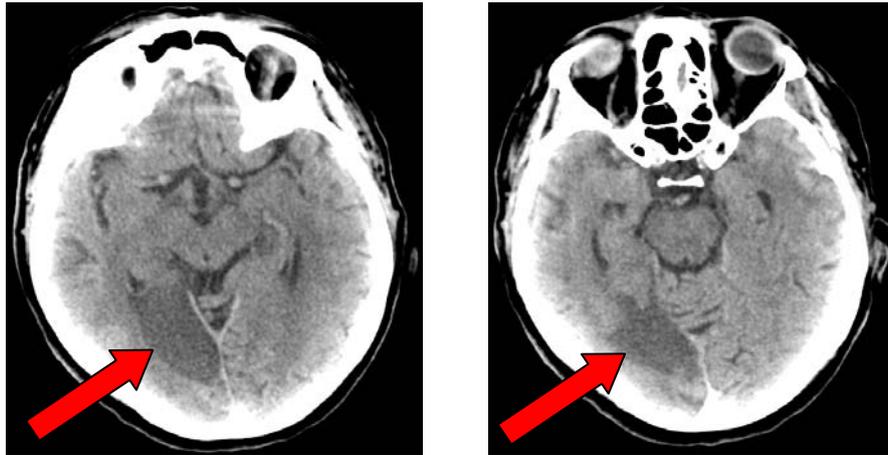
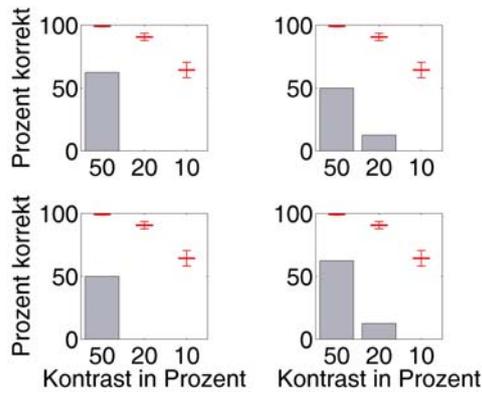


Abbildung 4.6: Patientin VB. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: Hirninfarkt ACP rechts.

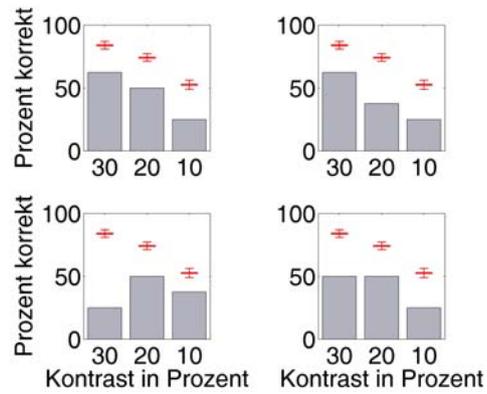
Patient SB.

Der Patient war zum Zeitpunkt der Untersuchung 38 Jahre alt, verheiratet und Vater zweier Kinder. Er besaß einen akademischen Abschluss und arbeitete im öffentlichen Dienst. Bei ihm wurde eine intracranielle Blutung rechts parietal nach einer Operation zwei Monate vor unserer Untersuchung festgestellt (Abbildung 4.7). Er hatte leichte Aufmerksamkeitsdefizite und eine Abduzensparese bei der Aufnahme in die Klinik. Sein Gesichtsfeld war unbeeinträchtigt. Bei diesem Patienten konnten Defizite in Detektion, Diskrimination und Kategorisierung nachgewiesen werden.

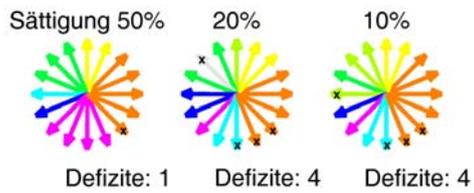
a)



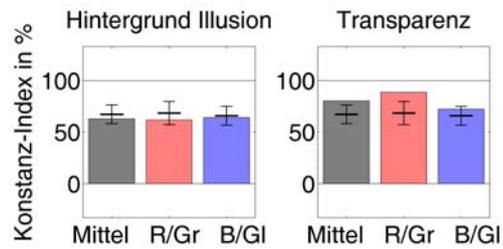
b)



c)



d)



e)

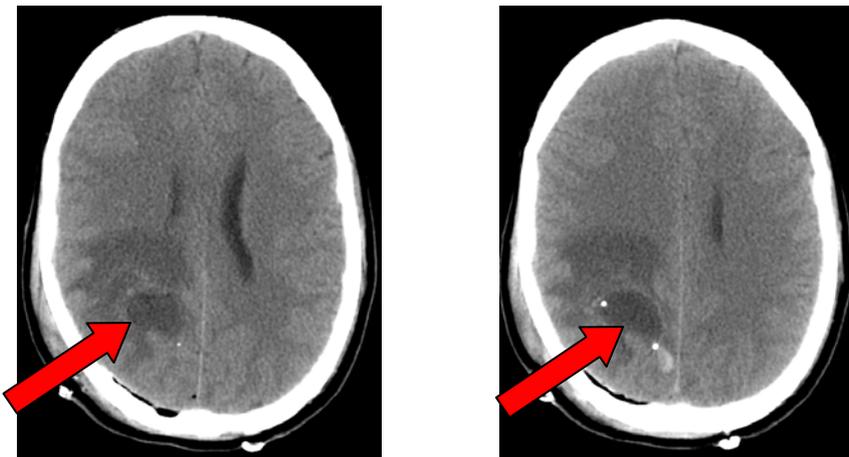
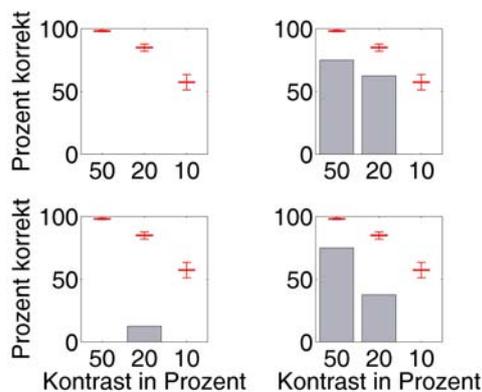


Abbildung 4.7: Patient SB. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: Intracraniale Blutung rechts parietal.

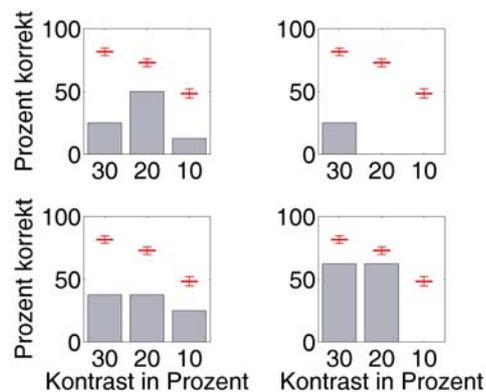
Patient EL.

Der Patient EL besaß einen Hauptschulabschluss und arbeitete zuletzt als kaufmännischer Angestellter. Er war 63 Jahre alt, verheiratet und Vater zweier Kinder. Bei ihm wurde ein Schlaganfall, ACP rechts, einen Monat vor unserer Untersuchung diagnostiziert (Abbildung 4.8). Sein Gesichtsfeld wies eine Quadrantenanopsie oben links auf. In dem Vortest wurde der Patient durch eine geringe Testleistung in den Ishihara-Tafeln auffällig, die laut Manual als abnormal zu beurteilen ist. Dennoch verneinte er die Frage nach diagnostizierten Farbschwächen oder -störungen. Das schließt jedoch nicht aus, dass eine Farbfehlsichtigkeit vorliegt und noch nicht festgestellt worden ist. Der Patient EL wies Beeinträchtigungen in Detektion, Diskrimination und Kategorisierung auf.

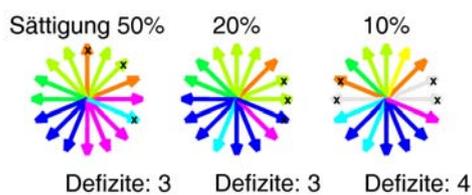
a)



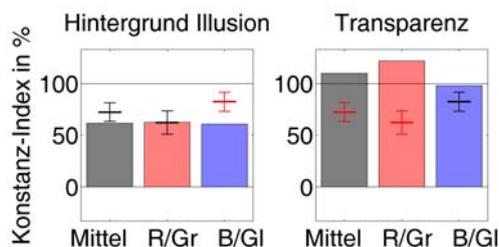
b)



c)



d)



e)

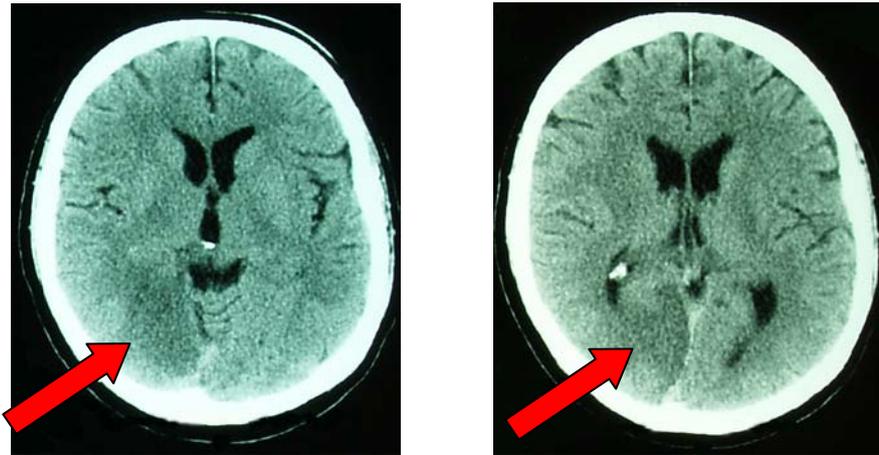


Abbildung 4.8: Patient EL. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: Schlaganfall, ACP rechts.

Läsionsanalyse der Patienten KK, VB, SB, EL

Die Abbildung 4.9 zeigt die Läsionen der oben vorgestellten Patientenfälle. Die verwendeten Farben kodieren die betroffenen Regionen von KK (rot), VB (grün), EL (gelb) und SB (blau). Der Überlappungsbereich ist violett dargestellt. Erstaunlicherweise lenkt diese Darstellung die Aufmerksamkeit in einen Bereich, der in der Literatur als Farbzentrum bezeichnet wurde (Lueck, Zeki, Friston, Deiber, Cope, Cunningham, Lammertsma, Kennard & Frackowiak, 1989) und der mit der Area TEO beim Affen korrespondiert (Heywood & Cowey, 1998). Neuere Untersuchungen (Bouvier & Engel, 2006) zeigen in diesem Bereich (Talairach Koordinaten [30 -73 -2] (Talairach & Tournoux, 1988)) eine Überlappung von sieben Achromatopsiepatienten, ebenfalls in der rechten Hemisphäre.

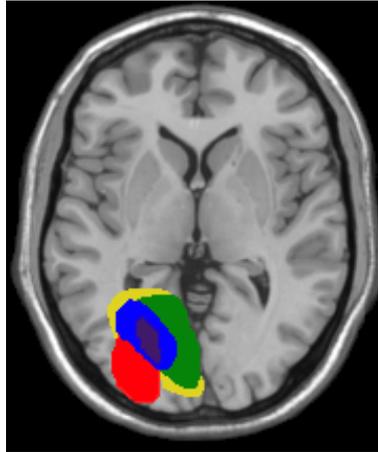


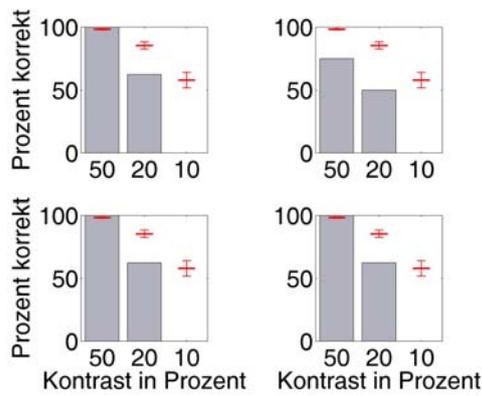
Abbildung 4.9: Läsionen der vier Patienten KK, VB, SB und EL im parieto-occipito-temporalen Bereich. Der Überlappungsbereich ist violett dargestellt.

Leistungsdefizite ausschließlich in Diskrimination

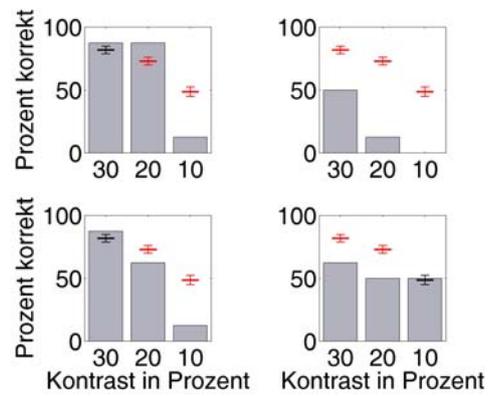
Patientin JH.

Wir lernten die Patientin JH zwei Monate nach ihrem Vorfall kennen. Sie war 61 Jahre alt, verheiratet und hatte eine Tochter. Sie schloss die Schule mit der mittleren Reife ab und arbeitete in leitender Funktion in der Werbebranche. Sie erlitt eine intracerebrale Blutung im linken Parietallappen (Abbildung 4.10), die unter anderem eine motorische Aphasie verursachte. Das Einzige zu verzeichnende Defizit war eine beeinträchtigte Unterscheidungsleistung.

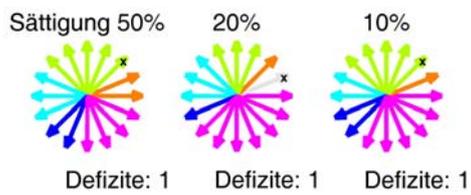
a)



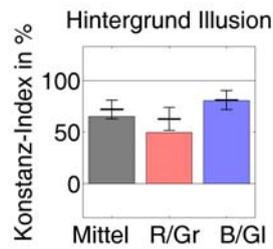
b)



c)



d)



e)

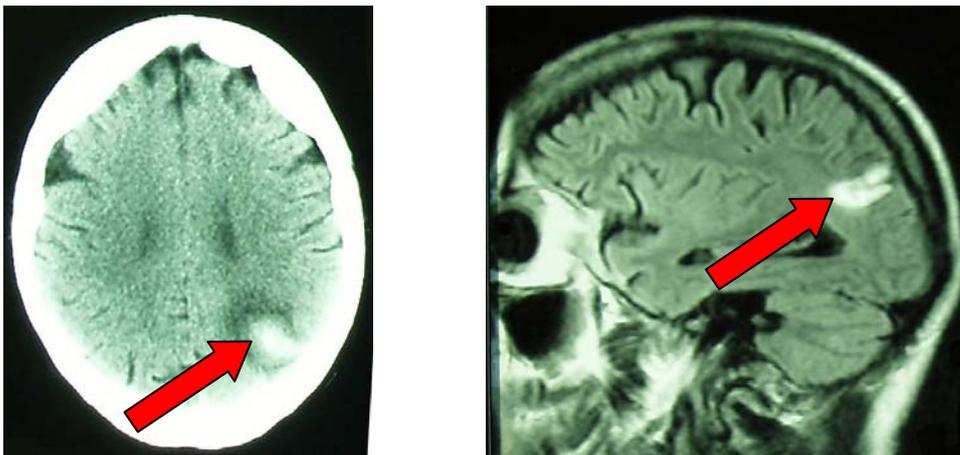
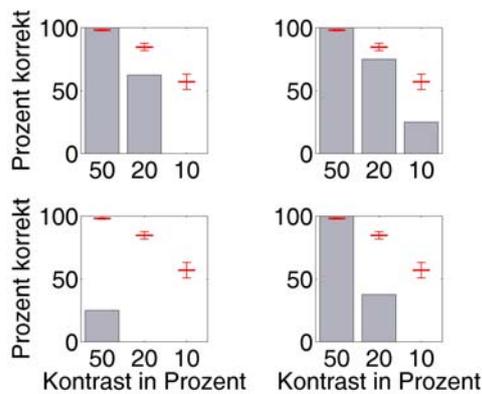


Abbildung 4.10: Patientin JH. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: ICB links, parietal.

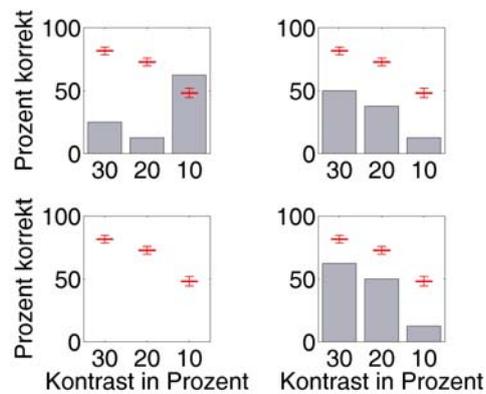
Patient DH.

Der Patient DH war 64 Jahre alt, verheiratet und hatte zwei Kinder. Er absolvierte die Realschule und arbeitete als Kaufmann im Bauwesen. Vier Monate vor der Untersuchung erlitt er einen Schlagfall rechts, der eine Hemiparese verursachte (Abbildung 4.11). Auch dieser Patient hatte als einzige Störung eine verminderte Diskriminationsleistung.

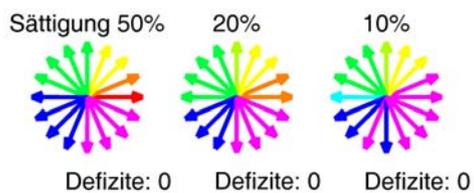
a)



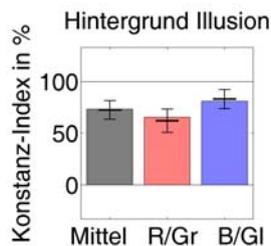
b)



c)



d)



e)

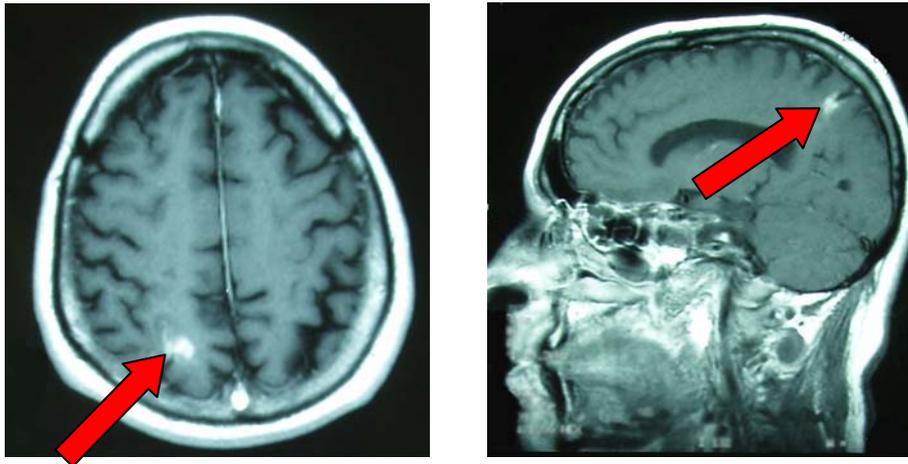


Abbildung 4.11: Patient DH. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: Schlaganfall rechts.

Läsionsanalyse der Patienten JH, DH

Diese beiden Patienten sind die einzigen, die exklusiv nur eine Beeinträchtigung in der Unterscheidungsleistung haben hinnehmen müssen. In der Abbildung 4.12 sind beide Läsionen auf die gleiche Seite gespiegelt. Die überlappende Region lässt sich beschreiben als parietal inferiorer Bereich an der Grenze zum Occipitallappen. Diese Region wird auch von Bouvier und Engel (2006) in die Diskussion um Achromatopsie eingebracht. Acht von elf Achromatopsiepatienten zeigen zwei kleinere Läsionen mit den Talairach Koordinaten [22 -74 36] und [28 -68 36], auch wenn die Autoren diese Schnittebene nicht abbilden. Diese Region liegt innerhalb des hier gezeigten Überlappungsbereiches.

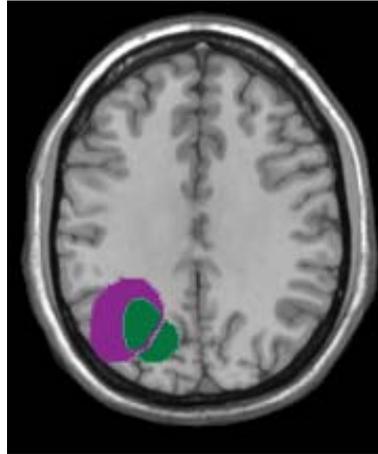


Abbildung 4.12: Läsionen der zwei Patienten JH und DH im parietalen Bereich.

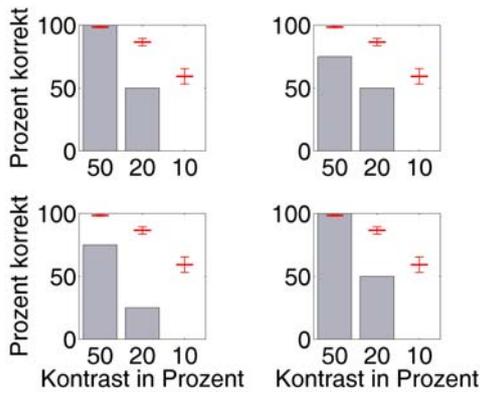
Leistungsdefizite in Kategorisierung und Diskrimination

Die folgenden drei Patienten zeigten Beeinträchtigungen in den Leistungen bei Diskrimination und Farbkategorisierung.

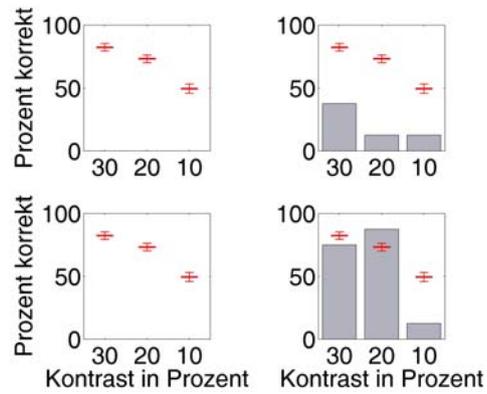
Patientin MR.

Die Patientin MR war zum Zeitpunkt der Untersuchung 56 Jahre alt, verheiratet und Mutter zweier Töchter. Sie hatte einen Hauptschulabschluss und arbeitete bis vor ihrer Erkrankung als Kauffrau. Wir lernten Sie einen Monat nach dem Schlaganfall kennen. Sie hatte einen ausgeprägt motorische Aphasie, aber keine Einschränkungen des Gesichtsfeldes. Der Schlaganfall trat im Bereich der rechten Arteria cerebri media auf (Abbildung 4.13).

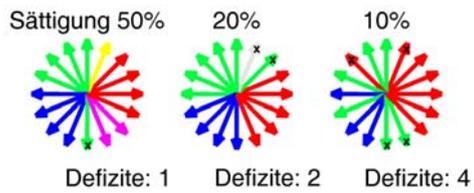
a)



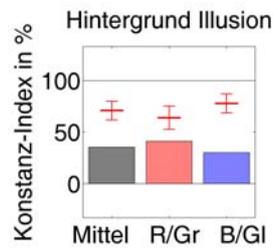
b)



c)



d)



e)

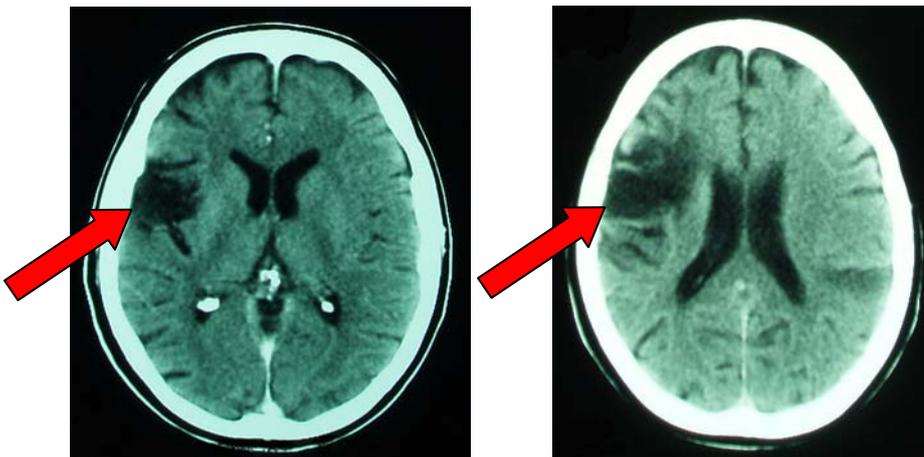
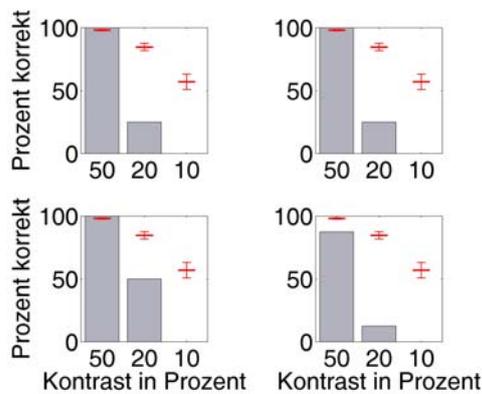


Abbildung 4.13: Patientin MR. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: Schlaganfall ACM rechts.

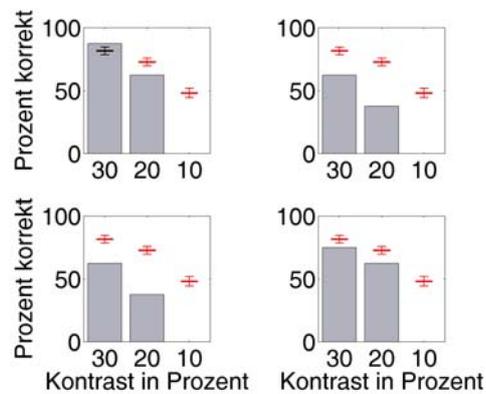
Patient GW.

Der Patient GW erlitt ebenfalls einen Monat vor der Untersuchung einen Schlaganfall im Medialstromgebiet rechts (Abbildung 4.14). Seine Erkrankung verursachte ebenfalls eine motorische Aphasie, ließ sein Gesichtsfeld jedoch intakt. Er hatte die mittlere Reife und arbeitete selbstständig als Heizungsbau-Meister. Wir lernten ihn im Alter von 64 Jahren kennen. Seiner Ehe entstammten drei Kinder.

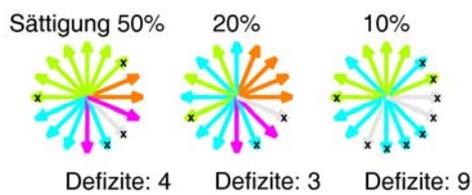
a)



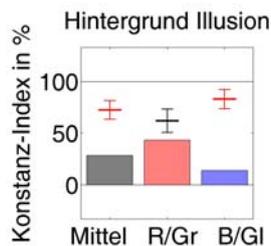
b)



c)



d)



e)

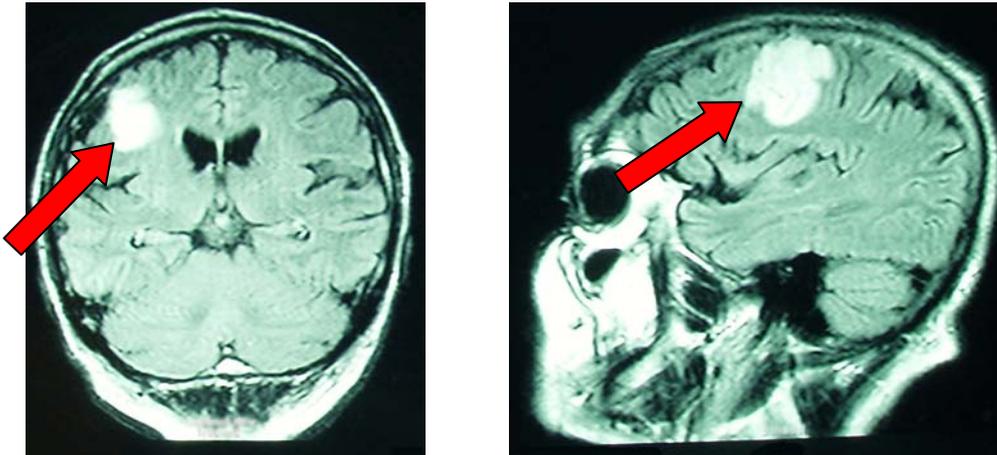
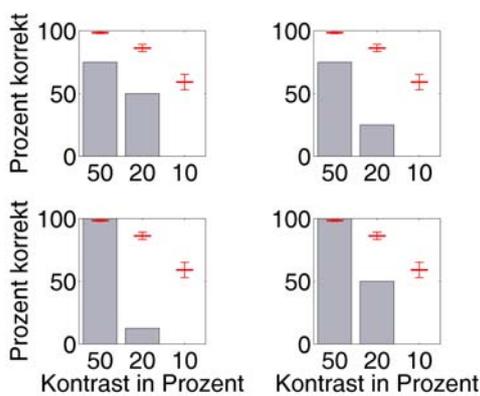


Abbildung 4.14: Patient GW. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: Schlaganfall ACM rechts.

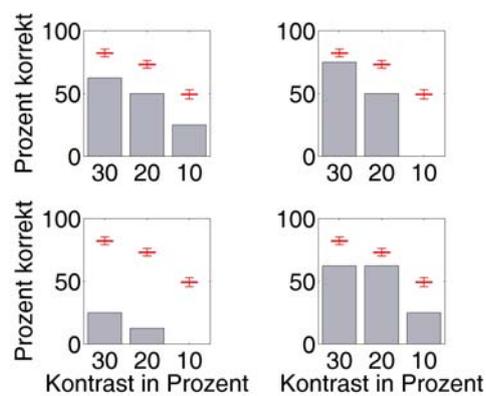
Patientin JP.

Die Patientin JP war 75 Jahre alt, verwitwet und Mutter zweier Kinder. Sie besaß die mittlere Reife, war gelernte Buchhalterin und arbeitete zuletzt in der Lebensmittelproduktion. Bei ihr wurde eine Subarachnoidalblutung aus einem Aneurysma der Arteria cerebri media rechts diagnostiziert (Abbildung 4.15).

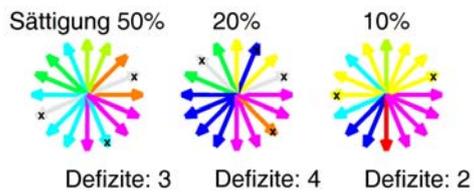
a)



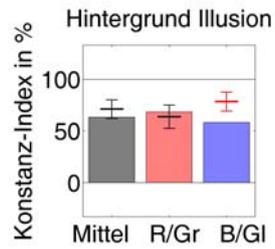
b)



c)



d)



e)

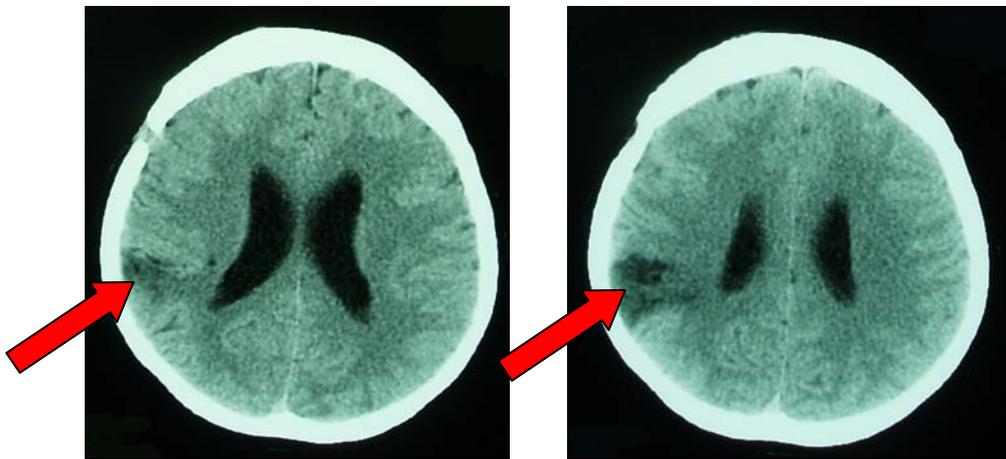


Abbildung 4.15: Patientin JP. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: SAB, ACM rechts.

Patient SB und Patient EL.

Die Patienten SB und EL wurden bereits oben beschrieben. Sie sind in unserer Stichprobe die einzigen Patienten, bei denen Defizite in den drei Aufgabengebieten Entdecken, Unterscheiden und Benennen auftreten.

Läsionsanalyse der Patienten MR, GW, JP, SB, EL

Die Abbildung 4.16 zeigt Läsionen der oben vorgestellten fünf Patienten. Die Farben entsprechen den Patienten MR (pink), GW (dunkelgrün), JP (hellgrün), SB (blau) und EL (gelb). Die zwei Überlappungsbereiche sind deutlich ersichtlich und wurden nicht speziell hervorgehoben. Die Patienten EL und SB wurden bereits bezüglich Ihrer Defizite in Detektion und Diskrimination betrachtet. Ihre Läsion erstreckt sich eindeutig über das in der Literatur als Farbzentrum diskutierte Areal V4. Ihre Beeinträchtigungen erstrecken sich über drei Aufgaben aus unserer Testbatterie. Die Läsionen der anderen drei Patienten MR, GW und JP streuen sowohl über mehrere Orte in der axialen Ansicht als auch über verschiedene coronare Schichten. Dieses Ergebnis ist übereinstimmend mit der Literatur, da bisher noch kein neurologisches Korrelat gefunden wurde, das als funktionale Entsprechung für die Kategorisierung von Farben angesehen werden kann. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass es kein „Kategorisierungsareal“ im Gehirn zu geben scheint.

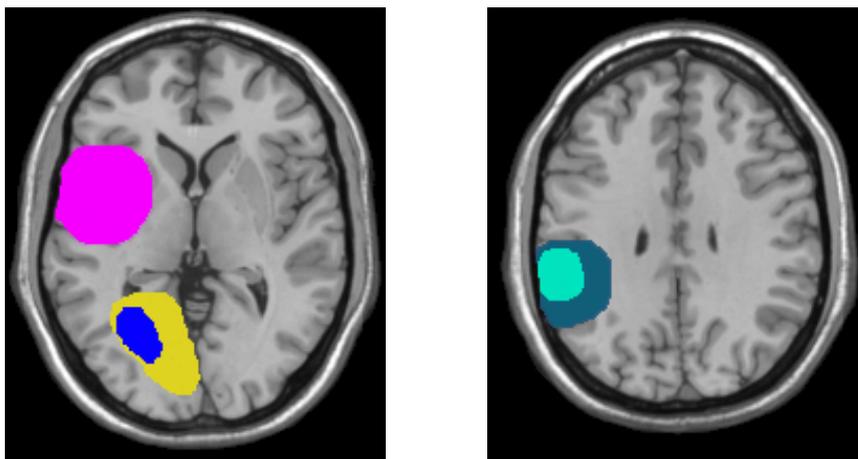


Abbildung 4.16: Läsionen der fünf Patienten MR, GW, JP, SB und EL im parieto-occipito-temporalen Bereich.

Leistungsdefizite in Farbkonstanz

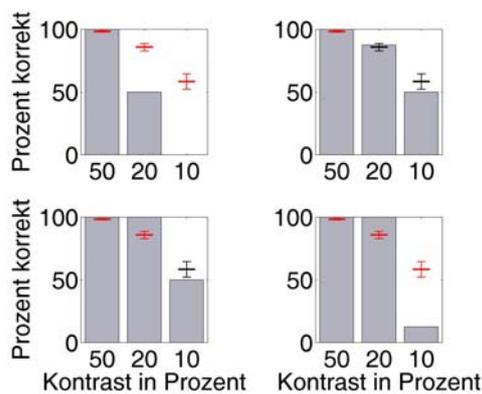
Patientin MR.

Eine ausführliche Beschreibung der Patientin MR inklusive Bildgebung des Schlaganfalls im Bereich der ACM rechts findet sich bereits oben.

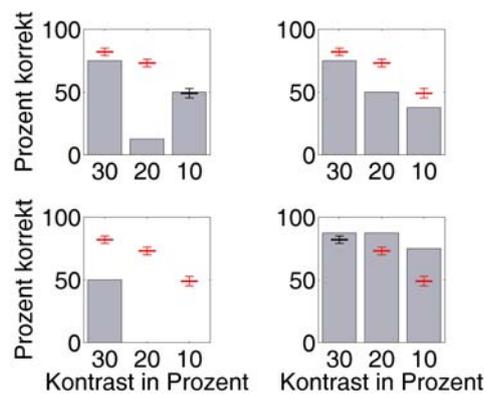
Patient AB.

Der Patient AB erlitt eine intracerebrale Blutung rechts occipital (Abbildung 4.17). Wir untersuchten ihn siebeneinhalb Monate nach dem Vorfall. Er zeigte keine Gesichtsfeldausfälle. Der Patient war verheiratet, akademisch gebildet und zum Zeitpunkt der Untersuchung 59 Jahre alt. Dieser Patient hat in beiden Farbkonstanzaufgaben Schwierigkeiten. Seine Einschätzungen können sowohl weit über als auch unter den optimalen Antworten liegen.

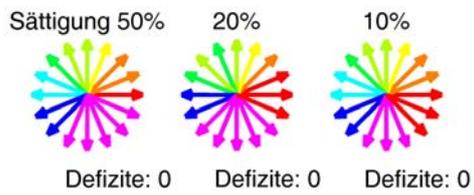
a)



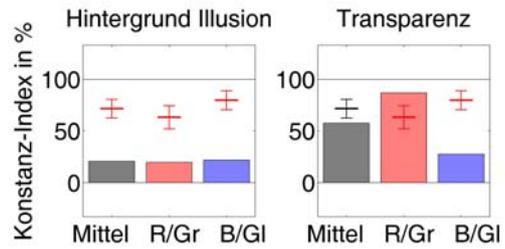
b)



c)



d)



e)

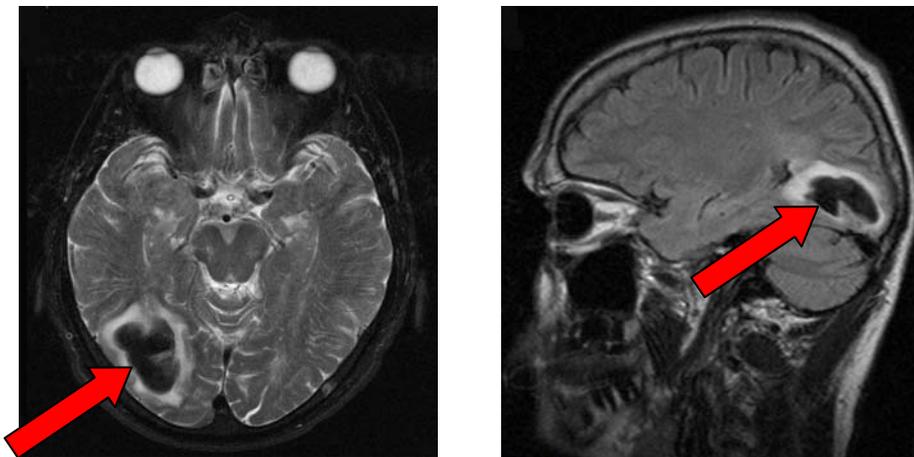


Abbildung 4.17: Patient AB. a) Detektionsleistung pro Quadrant
 b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung
 e) Bildgebung. Diagnose: ICB rechts occipital.

Patient KK.

Eine ausführliche Beschreibung des Patienten KK inklusive Bildgebung des Schlaganfalls im Übergangsbereich ACM & ACP rechts findet sich oben.

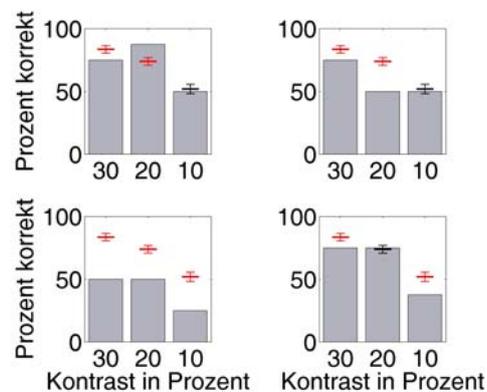
Patient MaS.

Herr MaS war 42 Jahre alt, verheiratet, kinderlos und schloss die Schule mit der mittleren Reife ab. Er war bis zu der Erkrankung als Programmierer tätig. Er erlitt vier Monate vor unserer Untersuchung eine Thalamusblutung links mit Ventrikeleinbruch (Abbildung 4.18). In der Folgezeit zeigte er multiple neurologische Beeinträchtigungen wie Dysarthrie, Dysphagie, Hemiplegie und Hemihypästhesie rechts sowie motorische und sensorische Aphasie. Herr MaS unterschätzt bei der Hintergrundillusion die Farben und überschätzt sie bei der Transparenzaufgabe. Speziell die Antworten auf blau/gelbe Reize sind bedeutsam unterschiedlich von der Norm. Die Detektionsleistung konnte bei ihm gar nicht gemessen werden. Präsentationszeit und Sättigung waren zu gering, als dass er bereits Reize geringer Schwierigkeit entdecken konnte.

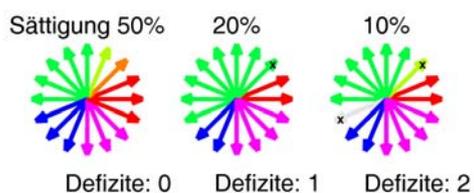
a)

Daten zur Detektion konnten nicht erhoben werden.

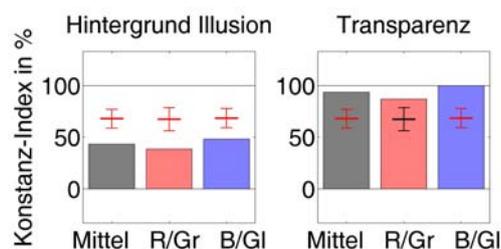
b)



c)



d)



e)

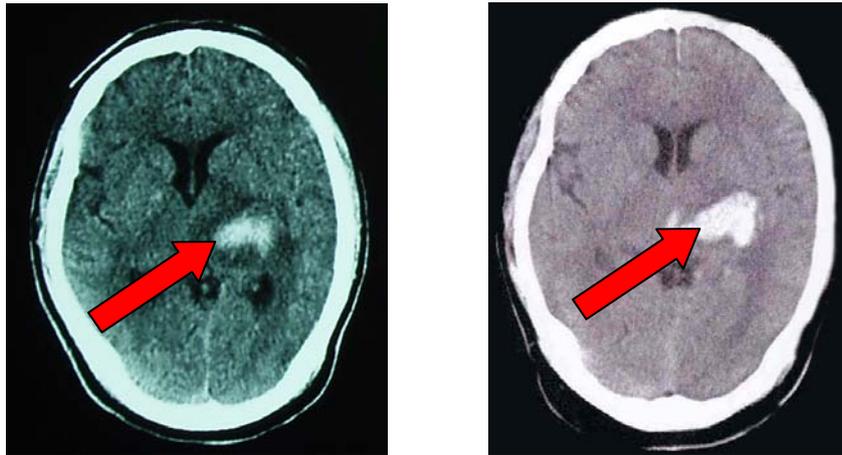
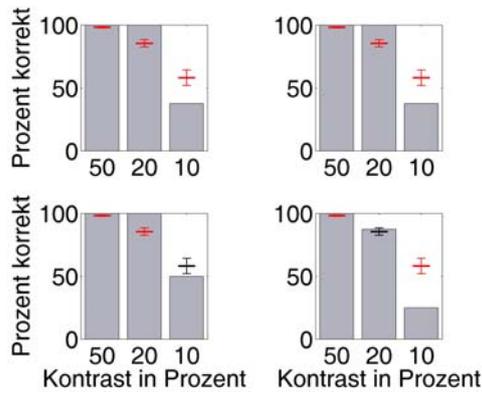


Abbildung 4.18: Patienten MaS. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: Thalamusblutung links.

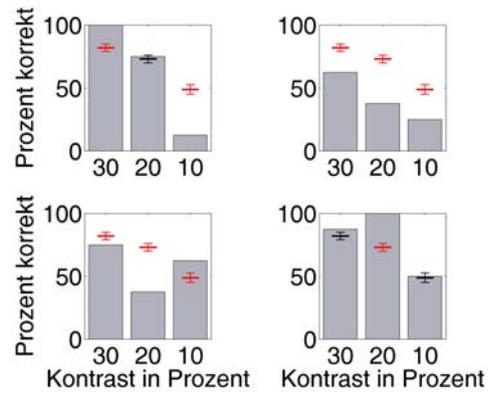
Patient WH.

Der Patient WH war 60 Jahre alt, verheiratet, Vater eines Sohnes und besaß eine akademische Bildung. Er arbeitete bis zu dem Vorfall in der Schulleitung. Einen Monat vor unserer Untersuchung erlitt er einen cardioembolischen Mediateilinfarkt links, der sowohl eine Hemiparese rechts als auch eine motorische Aphasie verursachte (Abbildung 4.19). Das Gesichtsfeld war nicht betroffen. Die Farbkonstanzleistungen dieses Patienten lagen unter der Norm und waren speziell bei Reaktionen auf blau/gelbe Reize bedeutsam beeinträchtigt.

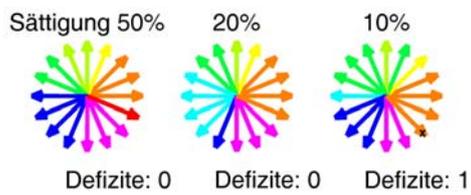
a)



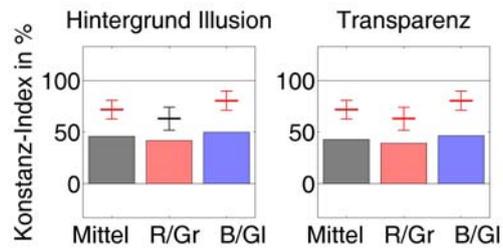
b)



c)



d)



e)

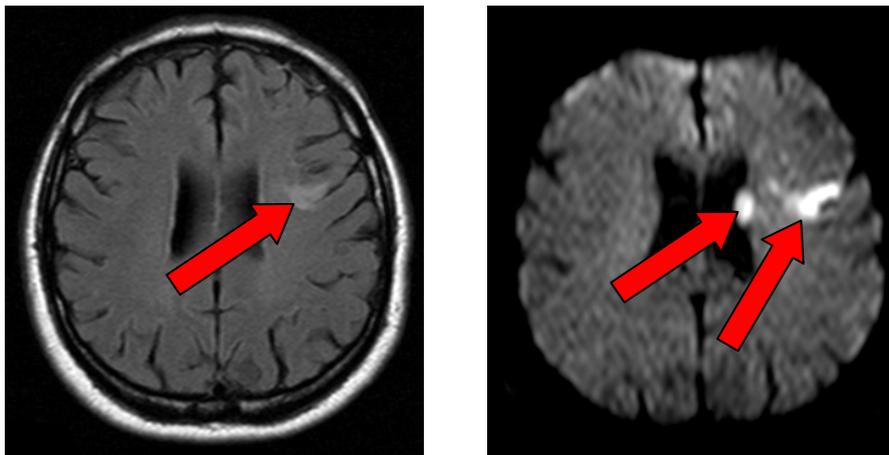


Abbildung 4.19: Patient WH. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: Schlaganfall ACM links.

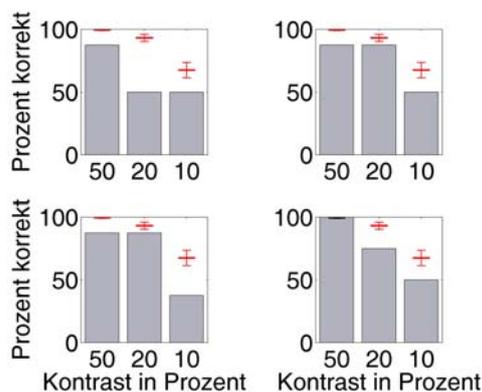
Patientin AS.

Die Patientin AS erlitt ein halbes Jahr vor unserer Untersuchung einen embolischen Mediainfarkt links, Zustand nach lokaler Lysetherapie bei Mediahauptstammverschluss. Aus der lokalen Lyse resultierte eine intracerebrale Stammganglienblutung links (Abbildung 4.20). Es zeigten sich neurologische Defizite, wie eine leichte Broca-Aphasie, eine rechtsseitige Hemiparese und eine unvollständige Hemianopsie nach rechts, beginnend bei ca. 20° Schwinkel.

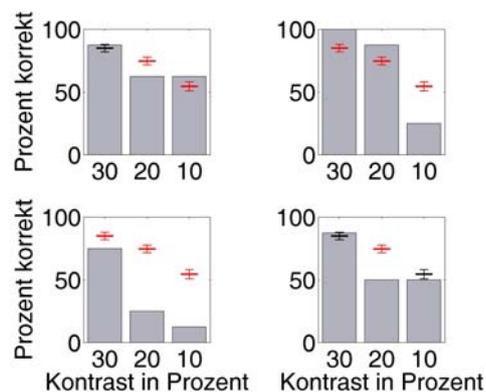
Sie war zum Zeitpunkt der Untersuchung ledig, kinderlos, 27 Jahre alt und hatte die mittlere Reife. Bis zu der Erkrankung arbeitete sie als Steuerfachangestellte in der Finanzbuchhaltung.

In den Farbkonstanzaufgaben traten sowohl Über- als auch Unterschätzungen auf. Die Antworten auf rot/grüne Reize wichen in beiden Konstanzaufgaben signifikant von der Vergleichsstichprobe ab.

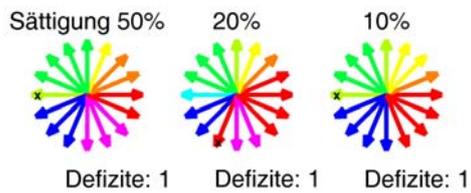
a)



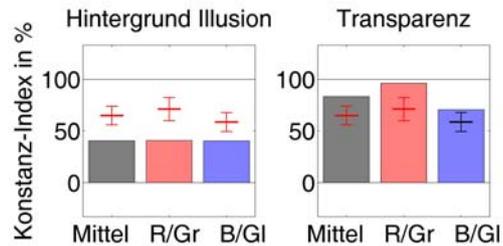
b)



c)



d)



e)

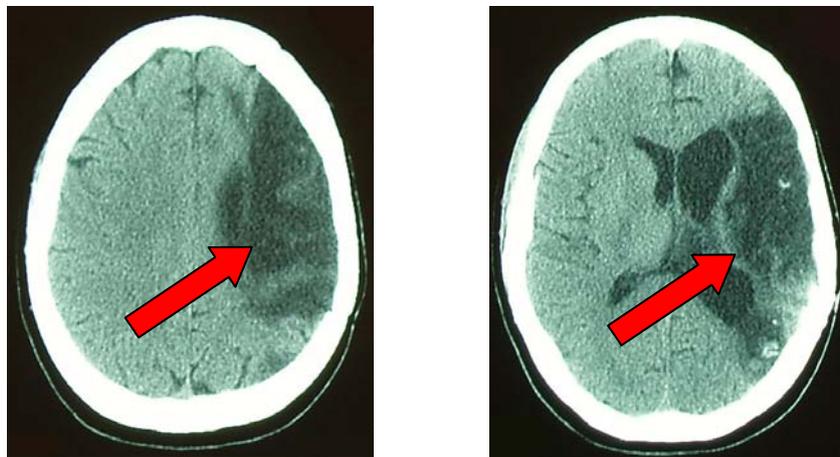
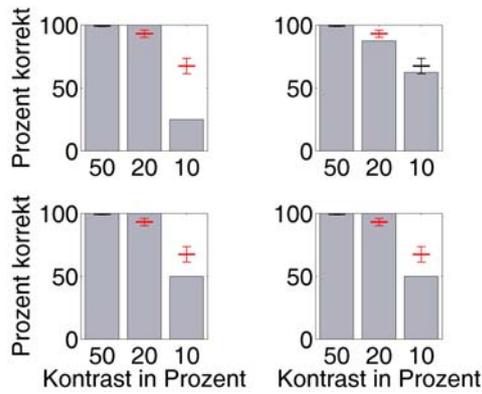


Abbildung 4.20: Patientin AS. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: ACM links.

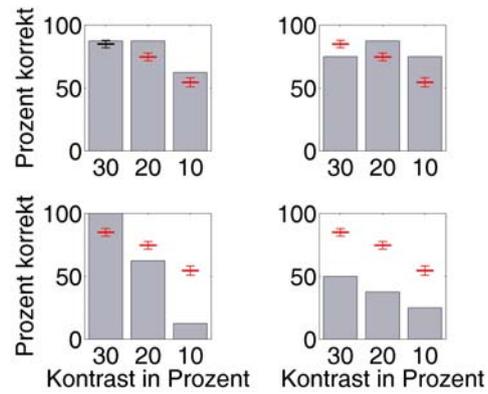
Patientin KN.

Die Patientin KN war 27 Jahre alt, geschieden, Mutter zweier Kinder, hatte die mittlere Reife und arbeitete als Floristin. Sie hatte zwei Monate vor unserer Untersuchung eine Subarachnoidalblutung aufgrund eines ruptierten Aneurysmas der Arteria Pericallosa (Abbildung 4.21). Auch bei dieser Patientin stellten speziell die Antworten auf rot/grüne Reize in den Konstanzaufgaben eine Schwierigkeit dar.

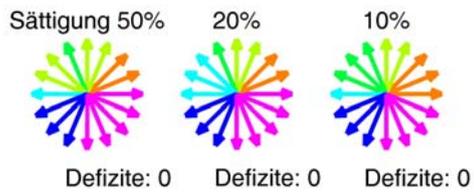
a)



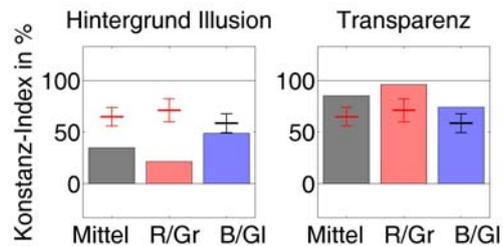
b)



c)



d)



e)

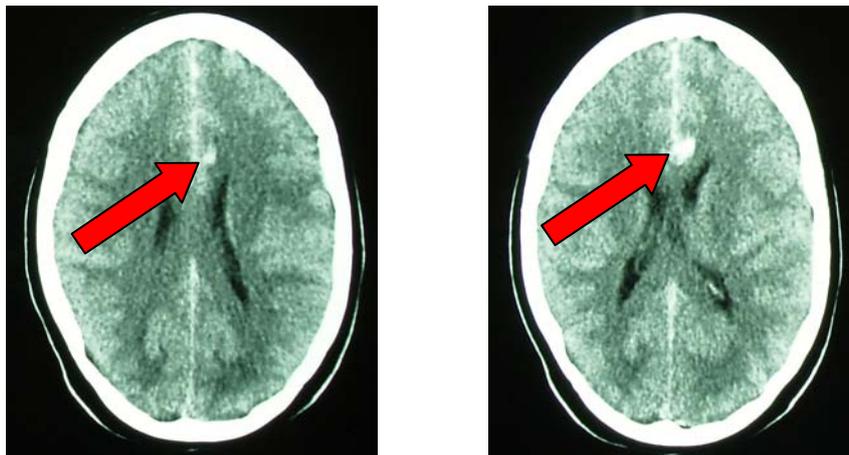


Abbildung 4.21: Patientin KN. a) Detektionsleistung pro Quadrant b) Diskriminationsleistung pro Quadrant c) Kategorisierung d) Konstanzleistung e) Bildgebung. Diagnose: SAB nach Aneurysmablutung, frontal, zwischen den Hemisphären.

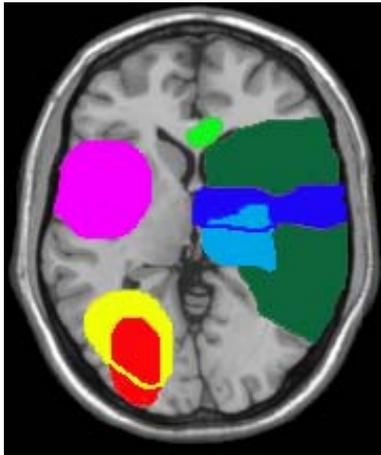
Patient HP (Ausschluss).

Der Patient HP war 62 Jahre alt, verheiratet, Vater zweier Kinder und besaß eine akademische Bildung. Wir untersuchten ihn einen Monat nach dem Vorfall. Sein Schlaganfall ereignete sich im Bereich der ACP rechts. Daraus resultierte eine Hemiparese, das Gesichtsfeld blieb unbeeinträchtigt. Die uns vorliegende Bildgebung war für eine genaue Läsionsortbestimmung leider ungenügend. Die Daten dieses Patienten können in die weitere Analyse nicht einbezogen werden.

Läsionsanalyse der Patienten MR, AB, KK, MaS, WH, AS, KN

Diese sieben Patienten zeigen ebenfalls ein diffuses Bild von Läsionsorten (Abbildung 4.22 a). Die Farben entsprechen den Patienten MR (pink), AB (gelb), KK (rot), MaS (hellblau), WH (dunkelblau), AS (dunkelgrün) und KN (hellgrün). Ausgehend davon, dass für die Wahrnehmung von Farbe keine Hemisphärendominanz vorliegt, haben wir in der Abbildung 4.22 b) alle Läsionen auf eine Seite nach links gespiegelt. Die Läsionen der vier Patienten MR, AS, WH, und MaS entsprechen durch die temporo-parietale Lage der Läsionsanalyse von Rüttiger et al. (1999). In ihrer Stichprobe traten vier Patienten auf, die ebenfalls Schwierigkeiten in der Bewältigung der Konstanzaufgabe hatten. In der anschließenden Kartographierung der Läsionen fanden sie eine Überlappung von drei Patienten, die unserer Überlappung von ebenfalls drei Patienten (MR, AS, WH) weitgehend entspricht. Einzig die Patientin KN lässt sich keinem Cluster zuordnen.

a)



b)

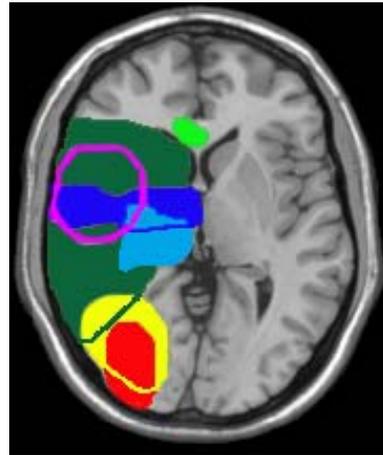


Abbildung 4.22: a) Läsionen von sieben Patienten (MR, AB, KK, MaS, WH, AS, KN).
b) Zum Vergleich wurden alle Läsionen nach links gespiegelt.

Läsionsanalyse der Patienten ohne Auffälligkeiten

In unserer Untersuchung traten sieben Patienten auf, die gemäß unseren Kriterien keine Defizite in der Farbwahrnehmung aufwiesen (CS, KE, LL, MoS, PK, UW, WR). Diese Patienten werden im Folgenden nicht im Detail beschrieben. Ein Überblick über die Läsionen findet sich in Abbildung 4.23. Die Abbildung zeigt die Läsionen der Patienten in folgenden Farben: CS = grün, KE = blau, LL = rot, PK = gelb, UW = orange, WR = violett. Die Bildgebung der Patientin MoS ist durch ein Aneurysma-Clipping der Arteria communicans posterior mit Artefakten behaftet und kann nicht interpretiert werden. Alle diese Patienten haben gemein, dass ihre Läsionen topographisch in höheren Schichten liegen. Ihre Läsionen betreffen sowohl frontale als auch parietale und occipitale Regionen. Läsionen des Temporallappens treten in dieser Patientengruppe gar nicht auf. Die Läsionen zeigen ein verstreutes Bild an beeinträchtigten Kortexregionen mit geringen Überschneidungen. Die für die

Farbwahrnehmung als relevant diskutierten Regionen V4, V8 und temporale Regionen wie fusiformer und lingualer Gyrus sind bei keinem der Patienten betroffen.

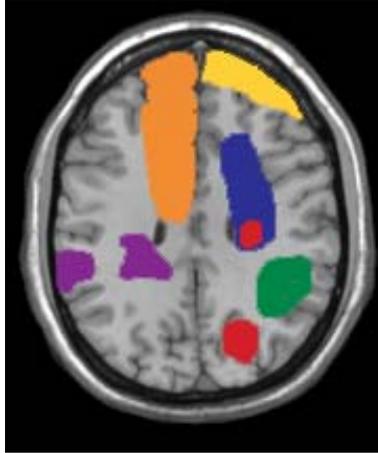


Abbildung 4.23: Läsionen von sechs Patienten (CS, KE, LL, PK, UW, WR) die hinsichtlich unserer Untersuchung zur Farbwahrnehmung unauffällig waren. Farbzuordnung im Text.

Diskussion

Wir führten Läsionsanalysen für die Ausfälle verschiedener Teilleistungen des Farbsehens durch. Bei korrespondierenden Defiziten sowohl in der Detektion als auch in der Diskrimination gingen vier Patienten in die Analyse ein. Der Überlappungsbereich, der sich aus der Darstellung der Läsionen im Template ergibt, ist relativ klein, eng umgrenzt und korrespondiert mit der in der Literatur diskutierten Region V4.

Es ist aus der Literatur bekannt, dass sich die Region V4 im Anteil an farbspezifischen Neuronen kaum von anderen Arealen des visuellen Kortex unterscheidet. Die Tendenz aktueller Diskussion führt also von der Annahme eines Farbzentrums weg und hin zu einem integrativen Ansatz verschiedener kortikaler Areale.

Bei der Läsionsanalyse für Farbkonstanzdefizite findet sich ebenfalls wieder die Area V4. Auch wenn es sich hier nicht um ein zentrales farbverarbeitendes Zentrum handelt, so lässt sich in Betracht ziehen, dass es anteilig am farbverarbeitenden Prozess beteiligt ist und sei es nur weiterleitend oder umschaltend.

Drei unserer Patienten, die Defizite in der Farbkonstanz zeigen, haben beschreibbare unilaterale Läsionen, die bedeutsam anterior und temporal des lingualen und fusiformen Gyrus liegen und somit dicht an der Insula im Sulcus lateralis. Diese Lokalisation ist übereinstimmend mit vorangehenden Untersuchungen (Rüttiger et al., 1999). Patienten mit Defiziten in der Farbkonstanz hatten Läsionen in der rechten (MR, AB, KK) oder linken (AS, WH, MaS) Hemisphäre. Daraus resultiert, dass es keinen Indikator für eine hemisphärenspezifische Verarbeitung der Farbkonstanz gibt.

Bei selektiv exklusiven Störungen der Diskriminierungsleistung, die bei nur zwei Patienten vorkommt, finden wir eine Läsion im parietal-inferioren Bereich, am

Übergang zum Occipitallappen. Diese Region ist bisher in der Diskussion um farbverarbeitende Prozesse nicht erwähnt worden.

Bei der Kategorisierungsaufgabe gibt es vereinzelte Überschneidungen zwischen den Läsionen zweier Patienten. Im Gesamtüberblick scheint aber keine Systematik hinter der Verteilung zu stehen. Dieses Ergebnis ist kongruent mit bisherigen Ergebnissen, die gegen die Annahme eines neuronalen Korrelates für Farbkategorisierung und –benennung sprechen.

Zusammenfassend unterstützt unsere Untersuchung die Annahme, dass es kein einzelnes Zentrum für Farbverarbeitung gibt. Farbwahrnehmung kann als Komplex verschiedener Teilleistungen betrachtet werden, bei denen höhere kortikale Areale interagierend beteiligt sind. Tendenziell bleiben die bereits diskutierten temporalen und occipito-temporalen Regionen im Fokus der Betrachtung. Weiterführende Forschung in Farbkonstanzleistungen könnte Offenheit gegenüber temporo-parietalen Regionen in Insula-Nähe zeigen, da zunehmend Hinweise für die Relevanz dieser Bereiche gefunden werden. Ebenso sollte der Farbwahrnehmung als Konstrukt ein fließender Übergang zu unterstützenden Funktionen zugebilligt werden. So gibt es für farblich-sprachverwandte Aufgaben noch keine Studie, die ein physiologisches Korrelat postuliert. Die Bearbeitung dieser Aufgaben ist folglich nicht topographisch-phrenologisch einzugrenzen, sondern wird funktional-interagierend zu beantworten sein. Ebenso wird der Trend aktueller Farbforschung den Fokus erweitern müssen, um oberflächenrelevante Merkmale in die Aufgabenbewältigung von Farbaufgaben einzubeziehen.

5. Prototypische Achromatopsiepatienten

Als prototypischer Achromatopsiepatient gilt der in der Literatur vorgestellte Fall des Patienten M.S. (Cowey & Heywood, 1997; Heywood, Kentridge & Cowey, 1998a; Heywood, Kentridge & Cowey, 1998b; Heywood & Kentridge, 2003; Cole, Heywood, Kentridge, Fairholm & Cowey, 2003; Kentridge, Heywood & Cowey, 2004). Ein neuer und noch nicht in der Literatur berichteter Fall ist Y.E., der nach einem Schlaganfall unter Achromatopsie leidet und der mir mündlich von der Arbeitsgruppe in Durham (Heywood, Kentridge & Cole) im Dezember 2006 vorgestellt wurde.

Fallgeschichte des Patienten M.S.

Während seiner Zeit als Offiziersanwärter bei der Polizei verursachte ein Herpes-Virus eine großflächige Enzephalitis. Seine anfänglich sehr starken visuellen Beeinträchtigungen besserten sich innerhalb des ersten Jahres, hinterließen jedoch eine homonyme Hemianopsie links mit Aussparung der Fovea. Seine normale Sehschärfe ist erhalten geblieben, Korrekturlinsen sind nicht notwendig. Er leidet unter verschiedenen Agnosien, Objekte und Gesichter betreffend, aber erlitt keine Alexie, Agraphie oder Aphasie. Am bedeutendsten nimmt sich seine totale Achromatopsie aus, die ausschließlich auf cerebraler Ebene zum Tragen kommt, denn sein trichromatisches Zapfensystem ist nach wie vor intakt (Mollon et al. 1980). Laut Heywood, Cowey & Newcombe (1991) ist ebenfalls eine spektrale Sensitivität nachzuweisen, die auf eine erhalten gebliebene farboptionale Verschaltung von Ganglienzellen zurückzuführen ist. Seine Farbblindheit coexistiert mit normaler Sensitivität gegenüber chromatischen Kontrasten und kortikal evozierten Potentialen auf chromatische Muster. (Heywood, Nicholas & Cowey, 1996).

Mittels Funktioneller Magnetresonanztomographie wurden ventromediale Läsionen in beiden Hemisphären ermittelt, die lingualen und fusiformen Gyrus betrafen (Heywood et al. 1991). In der rechten Hemisphäre wurden sowohl zweiter, dritter als auch vierter temporaler Gyrus zerstört sowie der temporale Pol (Abbildung 5.1). Zusätzliche Verletzungen fanden sich im Gyrus parahippocampalis und im Lobus occipitalis unter Aussparung der caudalen Spitze des Sulcus calcarinus, was vermutlich die Ursache für die erhaltene foveale Sehleistung ist. In der linken Hemisphäre waren der vierte temporale Gyrus, der Gyrus parahippocampalis, der Pol des Temporallappens und das Gebiet medial-occipito-temporalen Verbindung zerstört. In den dorsalen Bereichen zeigten beide Hemisphären relative wenig Beschädigung.

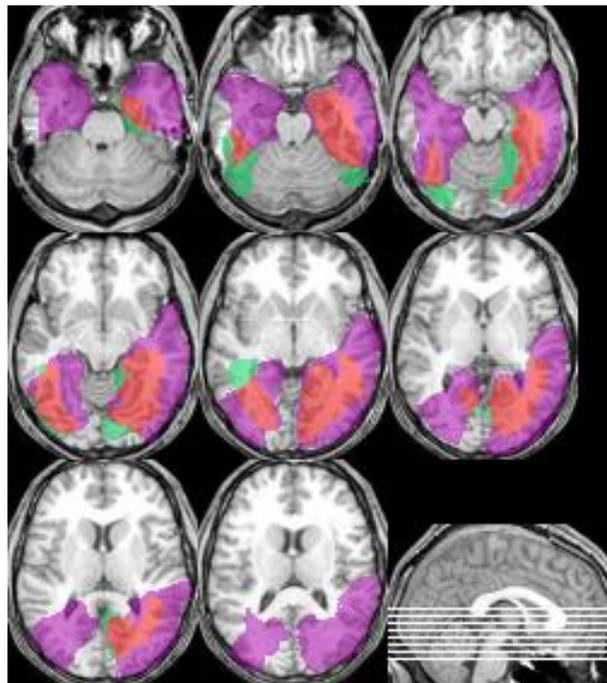


Abbildung 5.1: Mapping der Läsionen der beiden Patienten M.S. (Violett) und Y.E. (Grün). Der Überlappungsbereich ist Rot gekennzeichnet. Abbildung mit freundlicher zur Verfügungstellung von Heywood, Kentridge & Cole.

Residualeistungen des Patienten M.S.

In den gängigen Tests zur Diagnose von Farbfehlsichtigkeiten, wie z. B. dem Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Abbildung 5.2), bei dem 85 verschiedene Farbplättchen in eine Farbtonändernde Reihenfolge gebracht werden sollen, arrangiert M.S. die Farben nach dem Zufallsprinzip und erreicht dadurch sehr hohe Fehlerwerte von 1245 (Mollon et al., 1980).



Abbildung 5.2: Der Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test. Das erste und letzte Farbplättchen in jeder Reihe sind vorgegeben, die dazwischenliegenden sollen stufenweise absteigend arrangiert werden.

Heywood und Kollegen zeigen im Experiment, dass M.S. nicht zwischen Farben gleicher Helligkeit unterscheiden kann (Abbildung 5.3 a). Bei Darstellung einer geometrischen Figur unterschiedlicher Farbe, aber gleicher Helligkeit zum Hintergrund erkennt er die Form ohne Anstrengung (Abbildung 5.3 b). Wenn der chromatische Übergang sich jedoch langsam ändert, bemerkt der Patient M.S. die farbliche Änderung und die Figur vor dem Hintergrund nicht (Abbildung 5.3 c). Er benötigt für korrekte Urteile eine aussagekräftige Grenzlinie, die die chromatischen Flächen gegeneinander abtrennt.

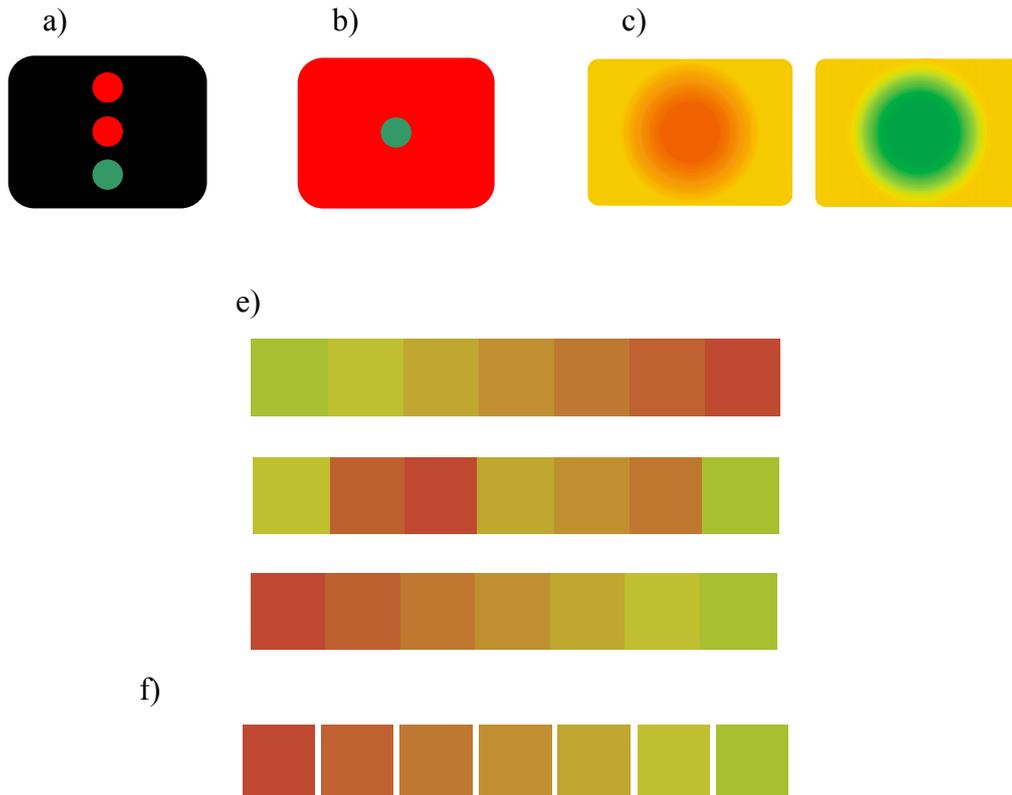


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Reizmaterials, mit dem die Residualleistungen von M.S. untersucht wurde. Die chromatischen Elemente sind equiluminant. Abbildungen mit freundlicher zur Verfügungstellung von Heywood, Kentridge & Cowey.

Bei aneinander angrenzenden Flächen verschiedener Farben ist es M.S. möglich, eine ungeordnete Farbfolge zwischen sinnvoll auf- oder absteigenden Farbenfolgen zu erkennen (Abbildung 5.3 e). Diese Fähigkeit wird ausgeschaltet, wenn die Flächen nicht aneinander angrenzen (Abbildung 5.3 f). Die auftretenden Abstände wirken maskierend auf die farbigen Flächen und nehmen ihm die Möglichkeit Vergleiche anzustellen.

Bewegungsreize sind dann ambig, wenn Grenzlinien im nächsten auftretenden Frame gleichabständig sind, so dass eine Zuordnung des Betrachters zu beiden Linien möglich und sinnvoll wäre. In Abbildung 5.4 a) ist ein ambiges Bewegungsmuster dargestellt. Die mittlere Linie in der obersten Reihe kann im nächsten Frame sowohl nach links als auch nach rechts verschoben betrachtet werden. Je nachdem welcher Interpretation man kognitiv folgt, bewegt sich das Muster entsprechend nach links oder

rechts, beziehungsweise wechselt zwischen beiden Richtungen. Die Abbildung 5.4 b) zeigt ein eindeutiges Muster. Die Linien zwischen den Feldern sind äquivalent zum vorangegangenen Beispiel, jedoch sind die Flächen coloriert und geben die Bewegungsrichtung eindeutig vor.

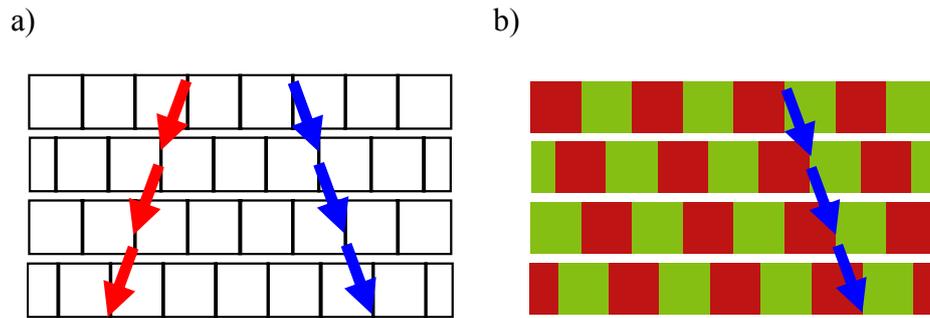


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung des Reizmaterials für ambige und eindeutige Bewegungswahrnehmung. Die chromatischen Elemente sind equiluminant. Abbildungen mit freundlicher zur Verfügungstellung von Heywood, Kentridge & Cowey.

Während eine normalsichtige Versuchsperson bei dem Reiz in Abbildung 5.4 a) Bewegungen in beide Richtungen wahrnehmen kann, wird bei Abbildung 5.4 b) immer eine Bewegung nach rechts gesehen. Bei einem Patienten mit zerebraler Achromatopsie ist bei dem Reiz a) das gleiche Verhalten zu erwarten. Bei dem Stimulus unter b) ist zu erwarten, dass gar keine Bewegung gesehen wird. Da M.S. bereits bewiesen hat, dass er Grenzlinien zwischen Farben erkennen kann, ist hier zu erwarten, dass er die Linien wahrnimmt und ebenfalls eine Bewegung mit ambiger Richtung sieht. Überraschenderweise unterscheidet sich M.S. bei den bewegten chromatischen Mustern in seinem Antwortverhalten nicht von unbeeinträchtigten Versuchspersonen. Er sieht ebenfalls ein Muster, welches sich eindeutig in nur eine Richtung bewegt.

Überraschenderweise, obwohl er verneint Farbe identifizieren zu können, ist er in der Lage, zwischen isoluminanten Farben unterscheiden zu können, die gegen einen farbigen Hintergrund dargestellt werden (Kentridge, Heywood & Cowey, 2004).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass M.S. Ausmaß und Ausrichtung von chromatischen Grenzen auf isoluminanter L/M-Ebene erfassen kann. M.S.' Fähigkeit, farbige Grenzen zu erkennen, scheint intakt, während die Wahrnehmung von Flächen- oder Objektfarben verloren gegangen scheint. Es liegt nahe, dass M.S. mehr Information wahrnimmt, als nur den schlichten Ort einer Grenze. Evidenz für doppelt farboponente Zellen in V1 lässt annehmen, dass Information über chromatische Grenzen relativ früh im visuellen System errechnet wird, während Oberflächenfarben durch komplexe Farbkonstanzmechanismen erst relativ spät berechnet und verarbeitet werden. Das ist konsistent mit der Annahme, dass sein unbeschädigtes Areal V1 noch zu doppelt farboponenten Verarbeitungen fähig ist. Diese Fähigkeit ist nicht gekoppelt an die subjektive Wahrnehmung von Oberflächenfarben. Folglich lautet die Frage, die von Kentridge, Heywood & Cowey (2004) behandelt wird, welche Aspekte der Farbkonstanz trotz Farbachromatopsie intakt bleiben.

Um Helligkeits- und Farbvariationen systematisch überprüfen zu können, stellten Kentridge et al. (2004) ihre Stimuli im Cone-Contrast-Space dar. Hier repräsentieren die Achsen die Änderungen, die ein Stimulus in der Zapfenerregung in Relation zum Hintergrund bewirkt. Kentridge und Kollegen variierten nur Reize, die langwellige und mittelwellige Zapfen ansprachen. Die Gesamtänderung der Zapfenerregung, der sogenannte Zapfenkontrast, korrespondiert mit dem Abstand vom Ursprung des Cone-Contrast-Space. Die spektrale Zusammensetzung des Stimulus variiert mit der Richtung vom Ursprung. In diesem Raum sind die Stimuli isochromatisch zum Hintergrund (das heißt das Verhältnis von L:M ist konstant), wenn

sie auf einer Geraden liegen, die in 45° durch den Ursprung verläuft. Da Isoluminanz von der Differenz der M- und L-Erregung abhängt, ändert sich die isoluminante Achse in Relation zum L/M-Verhältnis des Hintergrundes. Die Steigung der Isoluminanz-Achse ist $-L/M$. Die in diesem Versuch verwendeten Stimuli waren entweder isoluminant oder isochromatisch und wiesen Zapfenkontraste von 27.5 %, 20.625 %, 17.2 % oder 13.75 % auf. Die Versuchsperson sollte unter drei Kreisen auf einem farbigen Hintergrund denjenigen auswählen, der sich von den anderen zweien unterschied (Abbildung 5. a). In einer Kontrollbedingung wurden die gleichen Reize noch mit unscharfem Rand präsentiert (Abbildung 5. b) und in einer weiteren wurde der Rand mit einem schwarzen Ring versehen (Abbildung 5. c).

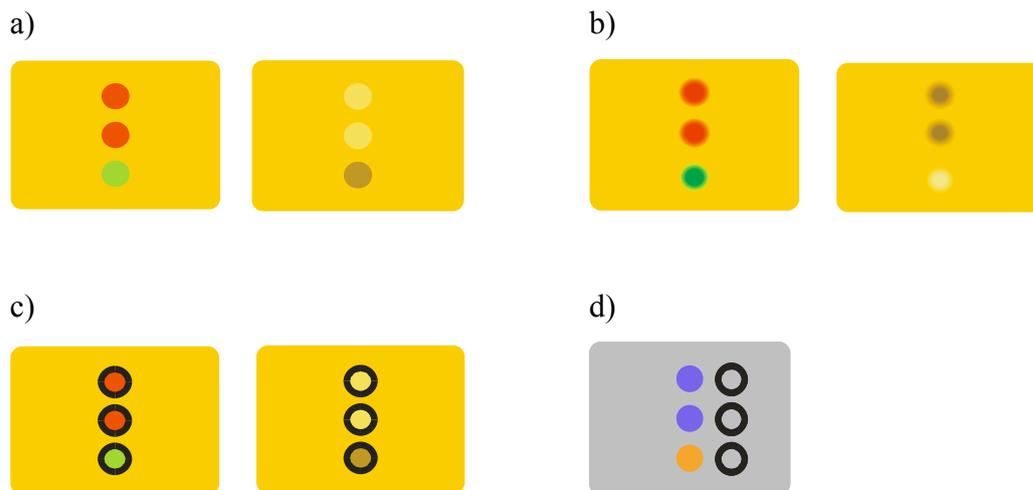


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung des Reizmaterials im Cone-Contrast-Space. a) isoluminante Reize unterschiedlicher Farbe und Reize unterschiedlicher Helligkeit mit deutlichem Kontrast zum Hintergrund. b) Reize mit unscharfem Rand. c) Ränder verdeckt mit schwarzem Ring. d) „displaced annulus“-Bedingung (aus Kentridge, Heywood & Cowey, 2004).

M.S. unterscheidet farbige Grenzen weitaus besser, als es per Wahrscheinlichkeit erwartet würde. Diese Leistung wurde auch bei unscharfem Rand kaum beeinträchtigt, jedoch völlig zerstört, wenn die Ränder vom schwarzen Ring verdeckt wurden. M.S. zeigt einen deutlichen Leistungseinbruch nahe isoluminanter

Reize, wohingegen Gesunde einen Leistungseinbruch bei isochromatischen Reizen haben. M.S.' Leistungsminimum ist nahe, wenn auch nicht identisch der photometrischen Helligkeitsgleichheit.

Eine zusätzlich interessante Kontrollbedingung in diesem Experiment war der 'displaced annulus', ein schwarzer Ring, der neben dem farbigen Reiz präsentiert wurde und die Grenze zum Hintergrund nicht verdeckte (Abbildung 5. d). Die Unterscheidung zwischen den zwei gleichen zu dem ungleichen Zielreiz fiel M.S. bei Anwesenheit des hochkontrastiven Helligkeitsunterschiedes auch hier bedeutsam schwer. Die Bedingung überprüfte, dass die bloße Anwesenheit eines Ringes mit hohem Kontrast ausreichte, um die Diskriminationsfähigkeit zu beeinträchtigen und es gar nicht notwendig ist, den chromatischen Rand zu verdecken.

Der nächste Versuch von Kentridge, Heywood & Cowey (2004) basierte auf Edwin Land's „Retinex Theorie“ der Farbwahrnehmung. Land schlug vor, dass eine farbige Grenze einen Schwellenwert übersteigen müsse, um als chromatischer Kontrast wahrgenommen zu werden. Graduelle Änderungen in der Farbe würden als Beleuchtungsänderung angesehen werden und nicht als unterschiedliche Oberflächenfarben.

Die Beleuchtungs-Invarianz sagt aus, dass der Kontrast zwischen zwei unterschiedlichen Oberflächen immer als gleich in Relation zueinander wahrgenommen wird, ungeachtet der Intensität der Beleuchtung.

Die Hintergrund-Invarianz geht davon aus, dass wir beim Übergang von einer Oberfläche zur nächsten einen Kontrast errechnen, der uns den Vergleich von zwei voneinander entfernt liegenden Farben ermöglicht. Wenn wir nur lokale Verhältnisse verrechnen, dann hängt die Wahrnehmung jeder Oberfläche nur von den sie umgebenden Flächen ab. Integriert man nun die lokalen Kontraste über eine

zusammenhängende Kette von Vergleichen, ist es möglich farbige Flächen zu vergleichen, ungeachtet der Beleuchtung oder des Hintergrundes.

Land's „Retinex Theorie“ ermöglicht nun, die Ebenen der Farbwahrnehmung für Beleuchtungs-Invarianz und Hintergrund-Invarianz zu entkoppeln. Vor dem graduell geänderten Hintergrund in Abbildung 5.6 a) wirkt der obere Kreis abweichend zu den anderen. Das liegt daran, dass die unteren beiden Scheiben den gleichen Kontrast relativ zum Hintergrund haben. Wird jedoch der sich graduell ändernde Hintergrund durch einen gleichmäßigen ersetzt (Abbildung 5.6 b), wird deutlich, dass der mittlere Kreis tatsächlich der abweichende ist, während der obere mit dem unteren spektral identisch ist. Unsere Wahrnehmung wird also durch den graduell geänderten Hintergrund in die Irre geführt.

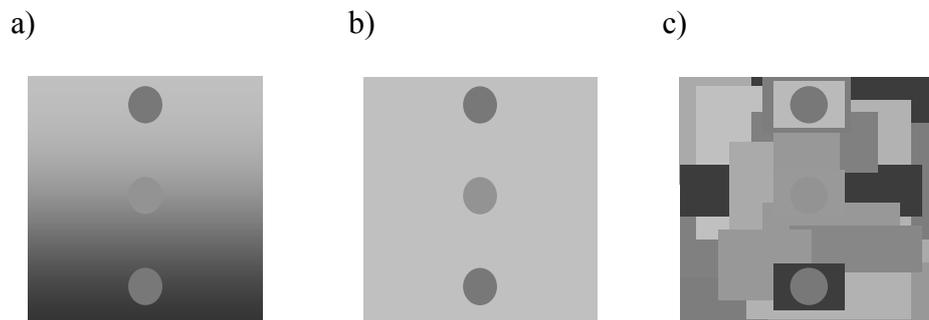


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung des Reizmaterials aus Kentridge, Heywood & Cowey (2004) im Rahmen der Drucktechnischen Möglichkeiten. Drei Kreise, deren mittlerer heller als die andern beiden ist vor a) einem sich graduell ändernden Hintergrund; b) gleichmäßigem Hintergrund; c) Mondrian-Muster, wobei die mittlere Helligkeit des Feldes hinter dem Kreis äquivalent zur mittleren Helligkeit hinter den Kreisen in a) ist.

Wird jedoch jede Scheibe mit gleichmäßigen Quadraten unterschiedlicher Helligkeit entnommen dem Spektrum des ursprünglich graduell geänderten Hintergrundes hinterlegt, so ist die Hintergrund-Invarianz weitgehend wieder hergestellt. Über die zusätzlich eingefügten Quadrate wird die Berechnung der lokalen

Kontraste möglich (Abbildung 5.6 c) und führt dazu, dass der obere und der untere Kreis von gesunden Beobachtern eher als äquivalent angesehen werden als in Abbildung 5.6 a). Die gleiche Illusion wurde ebenso mit Farben durchgeführt, wobei die obere Scheibe vor dem graduellen Hintergrund wesentlich gesättigter erschien.

Wenn weder Beleuchtungs- noch Hintergrund-Invarianz eine Rolle spielen würden, dann müsste ein Beobachter die spektral identischen obere und untere Scheibe als gleich ansehen auf dem Hintergrund in Abbildung 5.6 a). Wenn die lokalen Kontraste, die die Beleuchtungs-Invarianz unterstützen zum Tragen kommen, dann wird der Beobachter die mittlere und die untere Scheibe als gleich ansehen.

Wenn ebenfalls die Integrationsprozesse operieren, die die Hintergrund-Invarianz unterstützen, dann müssten die obere und untere Scheibe vor dem Mondrian-Feld in Abbildung 5.6 c) als gleich gesehen werden. Normale Beobachter wählen in 90 % der Fälle den oberen Kreis in Abbildung 5.6 a) als den Ungleicheren und 85 % den mittleren vor dem Mondrian-Hintergrund. M.S. wählt in 82 % der Fälle den oberen in Abbildung 5.6 a) und in 62 % der Fälle den oberen vor dem Mondrian-Muster als ungleich zu den anderen. Seine Wahl vor dem graduellen Hintergrund zeigt, dass M.S. Beleuchtungs-Invarianz besitzt, jedoch wählt er immer noch nach dem auffälligen Kontrast, wenn die Integration von Kanten bereits Hintergrund-Invarianz unterstützen müsste.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass M.S. auf der Basis lokaler chromatischer Kontraste antwortet, ungeachtet seiner Achromatopsie. Sein striärer Kortex ist intakt, charakterisiert durch das doppelt farboponente Verhalten und konsistent mit seinem Antwortverhalten auf der Basis lokaler Kontraste. Er hat die Fähigkeit verloren, Kontraste über größere Distanzen zu integrieren und infolgedessen auch seine

Farbkonstanz. Der zugrundeliegende Prozess für die Farbkonstanz von Hintergründen und seinen phänomenologischen Erfahrung von Farbe kann zusammenhängen.

Der Artikel von Kentridge, Heywood & Cowey (2004) behandelt noch die Frage, ob M.S. chromatische Information benutzen kann, um komplexe Objekte, in diesem Fall Wörter, voneinander abzugrenzen.

a)



b)



Abbildung 5.7: Schematische Darstellung des Reizmaterials aus Kentridge, Heywood & Cowey (2004) im Rahmen der Drucktechnischen Möglichkeiten.

Ihm wurden die beiden Sätze “Can MS use color borders to segregate objects?” und “The quick brown fox jumps over the lazy dog.” übereinanderliegend präsentiert (Abbildung 5.7 a). Einer der beiden wurde dargestellt in den L-Zapfen stimulierendem Rot und der andere in M-Zapfen stimulierendem Grün. Ohne Anstrengung konnte M.S. den zuoberst liegenden Text lesen und den anderen, wenn ihm etwas Zeit gegeben wurde. Um hierbei erfolgreich zu sein, musste M.S. die unterschiedlichen chromatischen Informationen verarbeiten. Anderenfalls hätte diese Aufgabe so schwer für ihn sein müssen, wie beide Texte in schwarzer Schrift zu lesen (Abbildung 5.7 b), worin sowohl er als auch die gesunden Versuchspersonen versagten.

Patient M.S. in unserer Testbatterie

Der Patient M.S. durchlief an drei aufeinanderfolgenden Tagen unsere Testbatterie im Labor der University of Durham / United Kingdom. Im Untersuchungsprozess wurden längere Zeiten eingeräumt für Instruktion, Übungsdurchgänge und Pausen. Bei der Darstellung der Ergebnisse in der Quadrantenanordnung (Abbildung 5.8) ist zu beachten, dass M.S. eine linksseitige homonyme Hemianopsie hat.

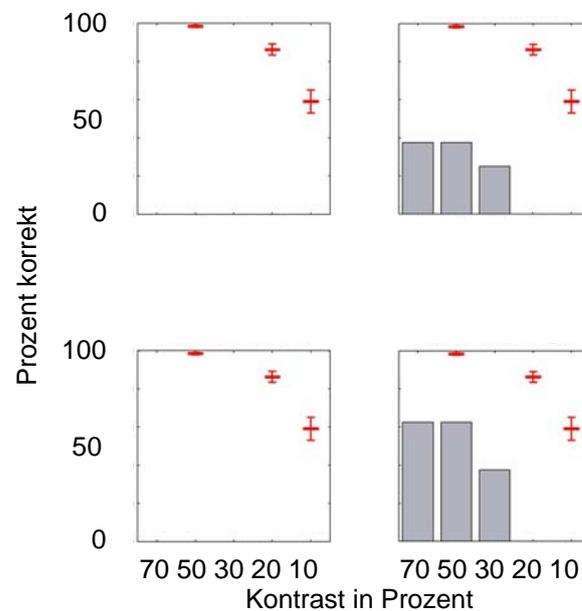


Abbildung 5.8: Detektionsleistung von M.S.: die Abszisse zeigt den Kontrast des Zielreizes zum grauen Hintergrund, die Ordinate die Leistung in Prozent. Darstellung für alle vier Quadranten separat. Die roten/schwarzen Linien zeigen den Mittelwert der Vergleichstichprobe gleichen Alters mit Standardfehlerbalken.

Auf der beeinträchtigten Gesichtsfeldseite zeigt M.S. wie zu erwarten keine Detektion. Auf der rechten Seite erreicht er bei 70 % und 50 % Kontrast im Mittel 50 % Detektionsleistung. Bei 30 % Kontrast sinkt seine Leistung auf Wahrscheinlichkeitsniveau ab. Darunter entdeckt er überhaupt keine Reize mehr. Die

Werte der Vergleichsstichprobe werden als schwarze Linie dargestellt. Unterscheiden sich die Leistungen der Versuchsperson bedeutsam ($\alpha = 0.05$) von der Normstichprobe, so wird die jeweilige Linie rot. Alle Leistungen von M.S. unterscheiden sich bedeutsam auf dem 5 %-Niveau von den Leistungen der Vergleichsstichprobe.

In der Diskriminationsaufgabe antwortet M.S. auch auf die in den fovealen Bereich hineinragenden Quadrate auf der linken Seite (Abbildung 5.9). Seine Leistung folgt keinem Verteilungsmuster und scheint unbeeinflusst vom Kontrast zwischen Vergleichsfarbe und Testfarbe zu sein. Im Mittel über alle Quadranten unterscheidet sich die Leistung nicht vom Zufallsniveau und er ist auch hier schlechter als die gesunde Vergleichsstichprobe.

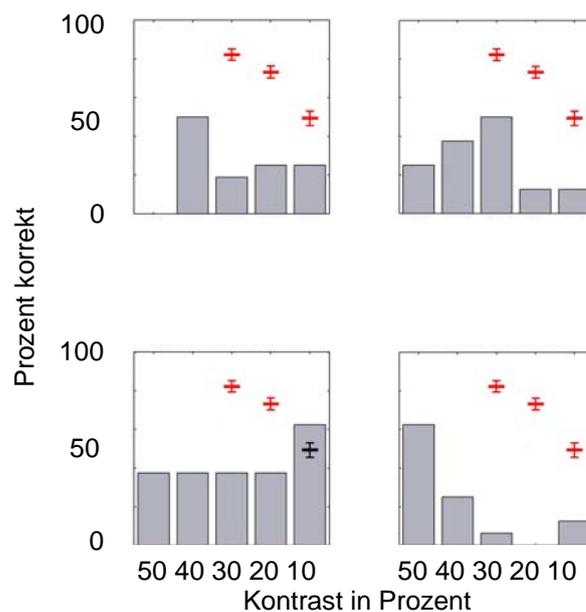


Abbildung 5.9: Diskriminationsleistung von M.S.: die Abszisse zeigt den Kontrast der Vergleichsfarbe zur Testfarbe, die Ordinate die Leistung in Prozent. Darstellung für alle vier Quadranten separat. Die roten/schwarzen Linien zeigen den Mittelwert der Vergleichsstichprobe gleichen Alters mit Standardfehlerbalken.

In der Konstanzaufgabe, die auf der Hintergrundillusion basiert, überschätzt M.S. die einzustellende Farbe (Abbildung 5.10 a). Er justiert die Einstellung im Mittel weit über die 100 % Farbkonstanz hinaus. Allerdings liegt seine Einschätzung der zu justierenden Farbe in der richtigen Richtung im Farbraum, wenn er auch im Mittel 50 % über der korrekten Farbkonstanz antwortet.

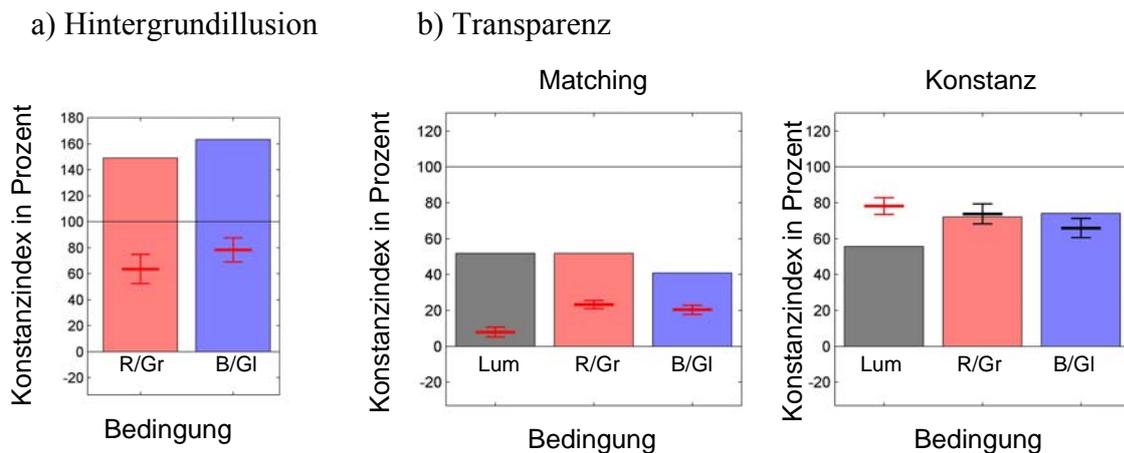


Abbildung 5.10: Leistungen in den Konstanzaufgaben von M.S. bei a) Hintergrundillusion und b) Transparenzaufgabe. Rot: rot-grüne Bedingungen, Blau: blau-gelbe Bedingungen, Anthrazit: Luminanz-Bedingungen, schwarze / rote Linien kennzeichnen die Leistung der Vergleichsstichprobe.

Die Konstanzbedingung der Transparenzaufgabe bewältigt er sowohl für Rot/Grün als auch für Blau/Gelb relativ gut. In der achromatischen Variante (anthrazitfarbener Balken) liegt er jedoch deutlich unter der Leistung der Vergleichsstichprobe. Bei der Matchingaufgabe liegt er sowohl bei den chromatischen als auch bei den achromatischen Bedingungen deutlich über den zu erwartenden Werten, die gegen 0 % tendieren sollten. M.S. Leistungen liegen im Mittel eher um die 50 %, was auf eine zufällige Auswahl der Antworten hinweisen kann.

In der Kategorisierungsaufgabe wurden den prototypischen Achromatopsiepatienten nur die Hauptfarben „Rot“, „Grün“, „Gelb“ und „Blau“ als

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass M.S. Reize ab einem Kontrast über 50 % in seinem intakten Gesichtsfeld entdecken kann. Die Unterscheidung der pastellartigen Farbtöne des DKL-Raumes werden von ihm kaum besser als auf dem Zufallsniveau unterschieden, ebenso wenig kann er sie benennen. In der Konstanzaufgabe überkompensiert er zwar sein Farbdefizit, hält dabei aber dennoch die korrekte Richtung im Farbraum ein. In der Transparenz-Matchingaufgabe antwortet er ebenfalls zufällig. In der Transparenz-Konstanzaufgabe liegen seine Ergebnisse erstaunlich dicht an denen der Vergleichsstichprobe.

Es lässt sich schlussfolgern, dass eine residuale Fähigkeit zur Farbkonstanz erhalten geblieben ist, wenngleich diese mitunter auch überkompensiert. Vergleich, Benennung und Matching sind ihm bei den Reizen des DKL-Farbraumes nicht möglich.

Patient Y.E. in unserer Testbatterie

Das Gesichtsfeld des Patienten Y.E. weist eine bilaterale Quadrantenanopsie oben mit fovealer Aussparung auf. Nur bei hochkontrastigen Reizen über 70 % gelingt ihm eine Detektion gegen den grauen Hintergrund (Abbildung 5.12) in seinem intakten Gesichtsfeld. Dennoch liegt er weit unterhalb dessen ($p < 0.05$), was gemäß seines Alters erwartet würde.

In der Unterscheidungsleistung liegt er zwar ebenfalls unterhalb dessen, was erwartet würde (Abbildung 5.13), aber in zwei Quadranten überwindet er die Schwelle der Zufallswahrscheinlichkeit ab Unterschieden über 20 %.

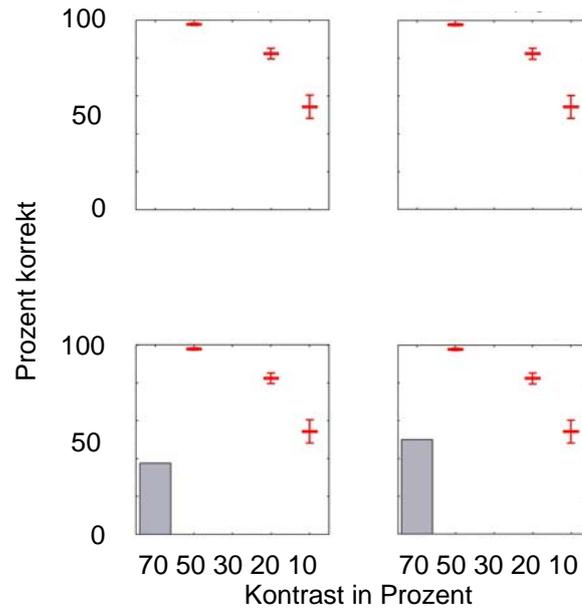


Abbildung 5.12: Detektionsleistung von Y.E.: die Abszisse zeigt den Kontrast des Zielreizes zum grauen Hintergrund, die Ordinate die Leistung in Prozent. Darstellung für alle vier Quadranten separat. Die roten/schwarzen Linien zeigen den Mittelwert der Vergleichstichprobe gleichen Alters mit Standardfehlerbalken.

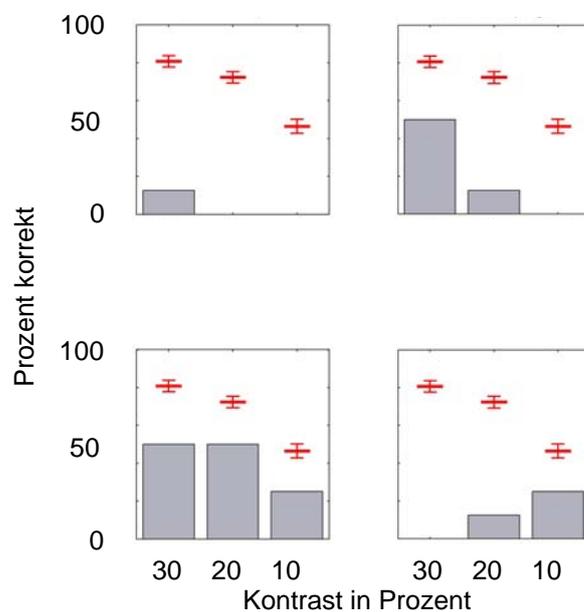


Abbildung 5.13: Diskriminationsleistung von Y.E.: die Abszisse zeigt den Kontrast der Vergleichsfarbe zur Testfarbe, die Ordinate die Leistung in Prozent. Darstellung für alle vier Quadranten separat. Die roten/schwarzen Linien zeigen den Mittelwert der Vergleichstichprobe gleichen Alters mit Standardfehlerbalken.

In der Benennung benutzt Y.E. die Farbe „Blau“ trotz mehrfacher Erinnerung gar nicht (Abbildung 5.14). Sein Antwortmuster zeigt viele Vertauschungen und lässt auf eine Ratestrategie schließen. Auch dieser Patient hat im Schnitt sieben bis acht Fehler pro Sättigung.

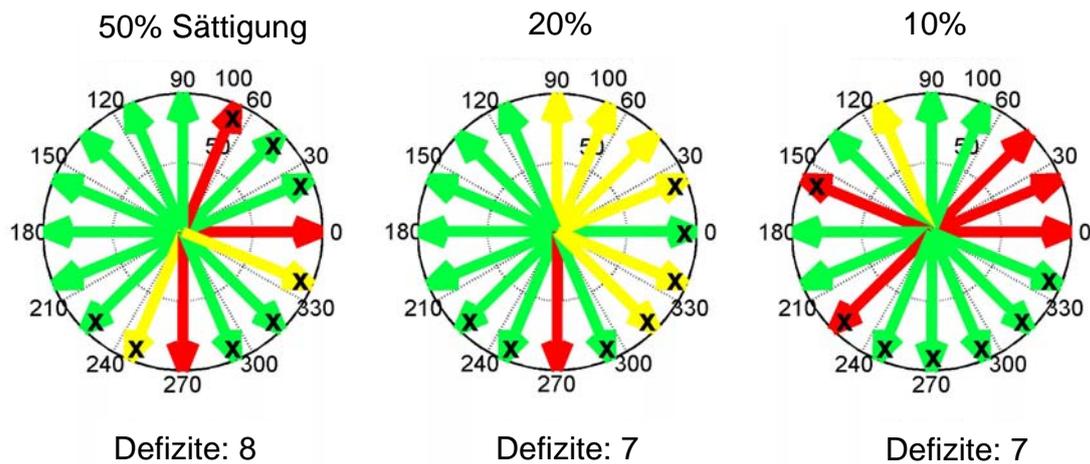


Abbildung 5.14: Leistungen der Kategorisierungsaufgabe von Y.E. Die Sättigung wird als Kontrast zum grauen Hintergrund (50 %, 20 %, 10 %) angegeben.

Die Konstanzaufgabe „Hintergrundillusion“ wurde nach einer längeren Instruktions- und Übungsphase abgebrochen. Die Bedienung der Tastatur bereitete ihm Schwierigkeiten durch seine grobe Motorik und dadurch, dass er auf keine Vorerfahrung im Umgang mit Computerbedienung zurückgreifen konnte. Zusätzlich erbrachte die Justierung keinen für ihn zufriedenstellenden Farbton, so dass er zwischen den beiden Grenzen des Farbraumes Variationen ausprobierte, ohne zu einem Ergebnis zu kommen.

Aus den Konstanzergebnissen der Transparenzaufgabe (Abbildung 5.15) lässt sich ersehen, dass in den rot/grünen Bedingungen ähnliche Leistung erzielt wird wie durch die Vergleichsstichprobe. Bei blau/gelben und luminanten Reizen ist seine Leistung geringer. In der Matchingaufgabe zeigen seine Ergebnisse ein uneinheitliches

Bild mit deutlicher Überschätzung der zu matchenden Farbe, wodurch der erwartete niedrige Wert der Vergleichsstichprobe verfehlt wird.

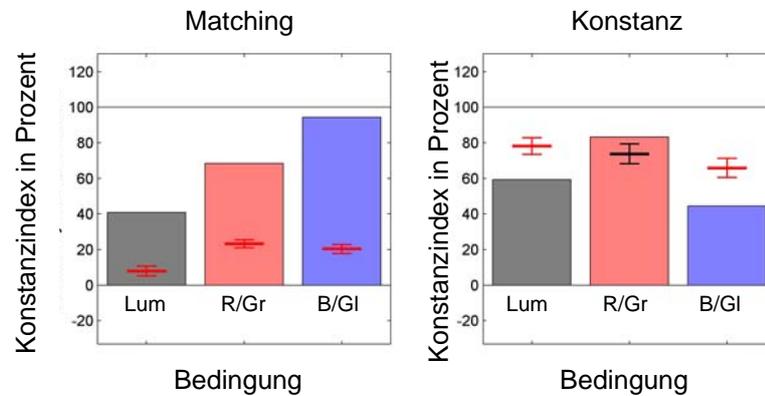


Abbildung 5.15: Leistungen in der Transparenzaufgabe von Y.E. Rot: rot-grüne Bedingungen, Blau: blau-gelbe Bedingungen, Anthrazit: Luminanz-Bedingungen, schwarze / rote Linien kennzeichnen die Leistung der Vergleichsstichprobe.

Zusammengefasst entdeckt Y.E. Reize nur mit sehr hohem Kontrast (70 %) in seinem gesunden Gesichtsfeld. Die Unterscheidungsleistung beschränkt sich auf gegenüberliegende Quadranten unten links und oben rechts ab 30 % Kontrast. Besonders blaue Reize bereiten ihm Schwierigkeiten. Weder benennt er sie, noch kann er aus ihnen das richtig konstante auswählen.

6. Farbwahrnehmung in der retinalen Peripherie

Die Ergebnisse sind immer noch widersprüchlich im Bereich der peripheren Farbwahrnehmung. Frühere Studien zeigten bereits Farbwahrnehmungsprozesse bis weit in die retinale Peripherie, doch haben diese Ergebnisse immer noch keinen Eingang in die generelle Meinung in Forschung und Lehre gefunden (Noorlander, Koenderink, den Ouden, & Edens, 1983). Gegenfarben-Mechanismen über 30 Grad Exzentrizität werden immer noch in Frage gestellt (Mullen & Kingdom, 2002; Mullen, Sakurai & Chu, 2005). Ein technisches Problem in vielen Untersuchungen kann sein, dass flache Präsentationsflächen wie Monitore benutzt werden (Mullen & Losada, 1999; Mullen & Kingdom, 2002; Mullen, Sakurai & Chu, 2005; Solomon, Lee, White, Rüttiger & Martin, 2005).

Die Fähigkeiten des Sehens unterscheiden sich in verschiedenen Bereichen des visuellen Feldes. Zum Beispiel ist unsere Bewegungswahrnehmung in den Randbereichen des Gesichtsfeldes besser als in der Fovea centralis. Der evolutionäre Sinn besteht darin, gegen eventuelle Angriffe rechtzeitig gewappnet zu sein, indem feindliche Annäherung bereits früh und am Rand des Gesichtsfeldes erkannt wird. Eine Verminderung der Leistung findet sich jedoch bei der räumlichen Summation und der Kontrastsensitivität, die zum Rande des Gesichtsfeldes hin abnimmt. Die Farbwahrnehmung verschlechtert sich ebenfalls, je weiter der Reiz vom Zentrum der Retina entfernt ist.

Eine erste Beschreibung der Farbwahrnehmung in der retinalen Peripherie findet sich bei Schober (1960). Er untersuchte das Gesichtsfeld mittels Farbperimetrie und verwendete rote, grüne, gelbe und blaue Reize mit einer Objektgröße von 25 Minuten im Rodenstock-Perimeter, die in Sättigung und Helligkeit untereinander gleich waren.

Seine Ergebnisse (Abbildung 6.1) zeigen, dass das Gesichtsfeld für Blau und Gelb im temporalen Bereich am größten ist und bis ca. 47° geht. Das Gesichtsfeld für Rot ist etwas kleiner und geht bis 37° . Die Wahrnehmung von Grün endet bereits bei 32° temporaler Exzentrizität.

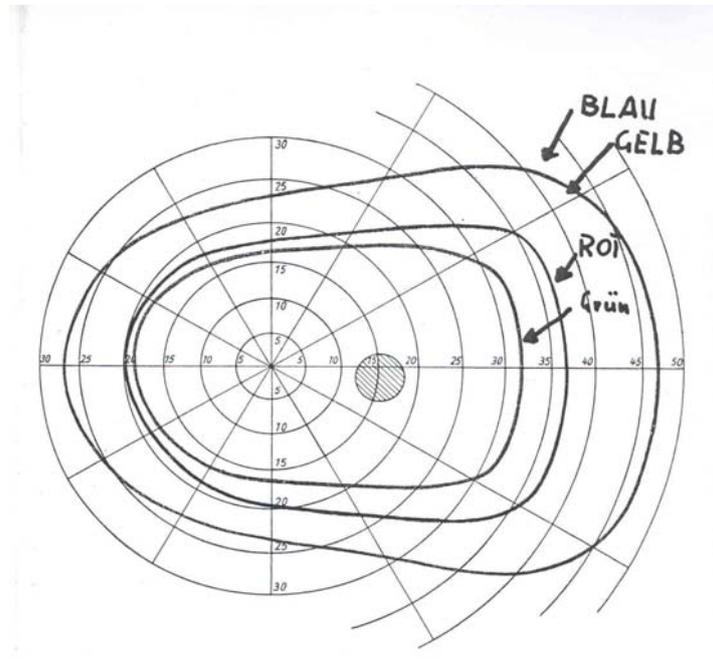


Abbildung 6.1: Das Farbensichtfeld des rechten Auges (Original aus Schober, 1960).

Diese Verschlechterungen werden in der Literatur (Abramov, Gordon, & Chan, 1991; Martin, Lee, White, Solomon, & Rüttiger, 2001) auf die räumliche Organisation der Retina zurückgeführt und sind nicht nur ein simpler Rückgang der Sensitivität in diesen Bereichen. Die Rezeptiven Felder in den Ganglienzellen der Retina beim Affen nehmen an Größe zu, je weiter sie in der Peripherie liegen. Dies begründet sich anatomisch in den größeren dendritischen Bäumen der Neurone und den größeren Abständen zwischen den Zellen. Diese Veränderung korrespondiert auch mit der kortikalen Repräsentation in V1 der jeweiligen Bereiche der Retina. Der foveale Bereich hat eine große Repräsentation im visuellen Kortex, während Randbereiche, die

für größere Flächen des visuellen Feldes zuständig sind, ein vergleichbares beziehungsweise geringeres kortikales Volumen aktivieren.

Abramov et al. (1991) empfehlen, Veränderungen bei Exzentrizität nicht als Defekt zu betrachten, sondern als normales Verhalten auf kleine, periphere Stimuli. Sie vermuten, wenn die Stimuli vergrößert würden, dann könnte die gleiche Leistung wie in der Fovea erbracht werden. Abramov untersuchte die wahrgenommene Sättigung und die Farbtöne bei mehreren Exzentrizitäten (foveal, 5°, 10°, 20°, 40°) und fand ein Absinken der Leistung in allen Fällen. Er verwendete im fovealen Bereich Reize mit einem Durchmesser von 1° und vergrößerte die Reize bis zu 6° bei 40° Exzentrizität. Bei entsprechender Vergrößerung der Reize erbrachten die Versuchspersonen *foveäquivalente Entsprechungen* in der Leistung. Dazu benötigte er bei 10° Exzentrizität Reize von 2° Durchmesser und bei 20° Exzentrizität Reize von 4° (nasal) und 6° (temporal) Durchmesser. Im Rahmen seiner technischen Möglichkeiten fand er keine adäquaten Reize für 40°, die zu entsprechenden Leistungen geführt hätten. Folglich schloss er für die Exzentrizität, dass sogar die größten Reize keine fovea-entsprechenden Antworten erwirken konnten. Als physiologische Erklärung wird in der Literatur die geringe Farbsensitivität der parvozellulären Verschaltung in der peripheren Retina angeführt.

Bereits Stromeyer, Lee & Eskew (1992) beschrieben das Verhältnis zwischen L- und M-Zapfen und deren Bedeutung für die periphere Wahrnehmung. Sie boten kurze rote und grüne Reize mit einem Durchmesser von 1° bei 12° Exzentrizität und mit 2° Durchmesser bei 21° Exzentrizität dar. Die Chromatische Sensitivität ist in der Fovea siebenmal höher als die Helligkeitssensitivität, fällt aber wesentlich schneller mit der Exzentrizität ab. Helligkeits- und chromatische Sensitivität sind ab 20° Exzentrizität vergleichbar. Ab 14° Exzentrizität ist eine deutliche Asymmetrie zwischen den

Reaktionen auf rote und grüne Reize zu beobachten. Grüne Stimuli werden deutlich schlechter erkannt als rote. Bei der Messung der Detektionskonturen zeigt sich, dass diese Rot-Grün-Asymmetrie keine Eigenschaft der L- beziehungsweise M-Zapfen-Antworten und damit des retinalen L-M-Verhältnisses per se ist, sondern auf postrezeptorale, nachgeschaltete chromatische Mechanismen zurückgeführt werden muss.

Es wurde früher angenommen, dass der parvozelluläre Pfad der Ursprung des Rot-Grün-Kanals sei. Heute wissen wir, dass weder der Parvo-Pfad völlig bewegungsblind, noch der Magno-Pfad völlig farbenblind sind (Gegenfurtner & Hawken, 1996). Die meisten Parvo-Zellen zeigen ein Verhalten von Rot-Grün-Gegenfarbencellen. Die Rezeptiven Feld (RF)-Zentren sind in der Peripherie der Retina größer und umfassen unselektiv ca. 20 – 40 L- sowie M-Zapfen. Dieser gemischte spektrale Input ist folglich der Grund für die verringerte Sensitivität für Rot-Grün in der Peripherie und wird in der Literatur als „Random wiring“ - Hypothese geführt (Martin et al., 2001). Andere Autoren (Mullen & Kingdom, 1996) bezeichnen dieses unselektive Verschalten der Ganglienzellen als „Hit and Miss Hypothesis“. Zusätzlich ist bekannt, dass sich das Verhältnis zwischen L- und M-Zapfen zum Rand der Retina hin ändert. Die Autoren entwickelten ein Modell, das die Abnahme von Gegenfarbenverhalten über das visuelle Feld berechnet. Hierbei berücksichtigt es sowohl das veränderte Verhältnis zwischen L- und M-Zapfen durch unselektive Verschaltung, wie es von der Makaken-Retina bekannt ist, als auch die Zapfendichte der menschlichen Retina. Es können drei unterschiedliche Fälle vorliegen, in denen erstens ein einzelner Zapfen im Zentrum dem opponenten Verhalten der Zapfen in der Umgebung des RF gegenüber steht, zweitens das Umfeld des RF aus gemischten L- und M-Zapfen bestehen kann und drittens das Zentrum des RF in der Peripherie so groß sein kann, dass es ebenfalls ein gemischtes

Verhältnis von L- und M-Zapfen enthält. Diese letzte Variante liegt überwiegend in der Netzhaut-Peripherie vor.

Es ist ein deutlicher Abfall des Gegenfarbenverhalten zu erkennen, der bereits bei geringer Zunahme an Zapfen im RF-Zentrum einen steilen Verlauf nimmt und flacher wird. Ähnliche Verteilungen werden ebenfalls für S-Zapfen angenommen (Mullen & Kingdom, 2002). Das Modell sagt voraus (Abbildung 6.2), dass mit zunehmende Exzentrizität das Verhältnis von Kontrastsensitivität Farbe zu Kontrastsensitivität Helligkeit abnimmt (durchgezogene Linie). Im Vergleich mit den psychophysischen Daten dreier Beobachter (Dreiecke, Kreise, Quadrate) zeigt sich die Güte des Modells.

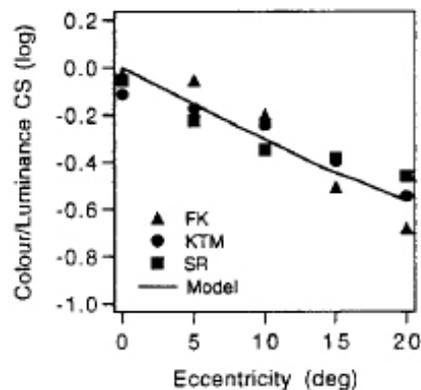


Abbildung 6.2: Verhältnis von Kontrastsensitivität Farbe zu Kontrastsensitivität Helligkeit als Funktion der Exzentrizität (aus Mullen & Kingdom, 1996).

Martin et al. (2001) untersuchten die „Random-Wiring“-Hypothese direkt, speziell die Sensitivität der Rot-Grün Modulation von Parvo-Zellen. Die Ableitung wurde direkt an der peripheren Retina anästhesierten Makaken vorgenommen, während Reize zwischen 20° und 50° Exzentrizität dargeboten wurden. Die Kontrastsensitivität wurde mittels roter und grüner LEDs untersucht. In den Ergebnissen (rechte Ordinate in Abbildung 6.3) zeigt sich, dass die Sensitivität der peripheren Zellen gegenüber Rot-

Grün bei peripheren Parvo-Zellen ähnlich der fovealer Parvo-Zellen ist. Hingegen zeigen menschliche Beobachter in psychophysischen Messungen (linke Ordinate in Abbildung 6.3) einen Abfall der Leistungen mit zunehmender Exzentrizität.

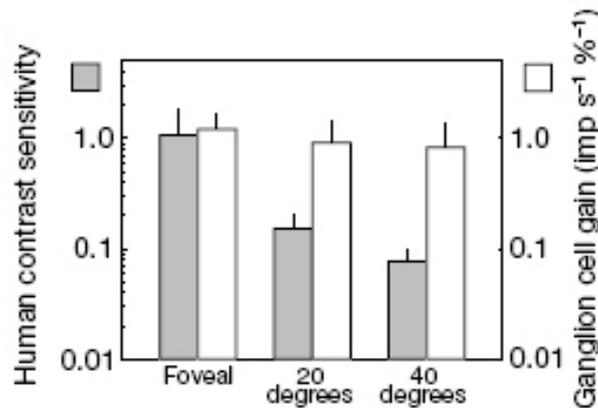


Abbildung 6.3: Vergleich von psychophysischer Sensitivität dreier menschlicher Beobachter und Gegenfarben-Kontrast der Parvozellen am Makaken bei isoluminanten Rot-Grün-Reizen (aus Martin et al., 2001).

Die Autoren berichten, dass die meisten peripheren Zellen (34 von 53, = 64%) ebenfalls das Verhalten von Gegenfarbencellen zeigten. Eine quantitative Analyse von 35 Zellen erbrachte, dass bei 80 % der Zellen die neuronale Antwort auf Wechsel zwischen Rot und Grün die Antworten auf Wechsel zwischen hellen und dunklen Reizen überstieg. Die meisten peripheren Zellen werden folglich von Rot-Grün-Wechseln moduliert, was ein klares Zeichen für Gegenfarbencellen ist wie sie in der Fovea auftreten. Folglich stellt sich die Frage, warum gleiches Zellverhalten zu unterschiedlichen psychophysischem Verhalten führt. Eine Eigenschaft von Zentren der Parvo-Zellen und dendritischen Feldern in der Peripherie ist, dass sie nicht rund, sondern oval sind (Abbildung 6.4).

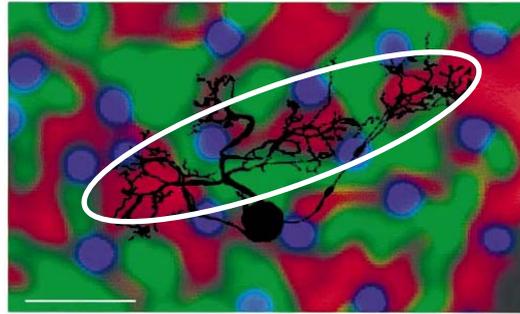


Abbildung 6.4: Dendritenbaum einer Parvozelle auf dem Ausschnitt des Retina-Mosaiks eines Makaken. Das rezeptive Feld ist durch das weiße Oval gekennzeichnet (aus Martin et al., 2001).

Ihr Erscheinungsbild ist elliptisch mit einem Verhältnis von 1:1,87. Die Autoren vermuten hierin die Ursache für das Ungleichgewicht zwischen L- und M-Zapfen. Im simulierten Vergleich zwischen den Gewichten zeigt sich, dass bereits kleine Orientierungsänderungen des elliptischen rezeptiven Feldes zu großen Änderungen im Zapfenverhältnis führen können (Abbildung 6.5). Das runde RF erzeugt ein Verhältnis zwischen dem L-Input und dem Helligkeitsinput L+M, das in der Abbildung 6 rechts mit einer durchgezogenen Linie dargestellt ist. Die Rotation eines elliptischen RF (Abszisse in Grad) führt zu Änderungen in diesem Verhältnis (Kreise).

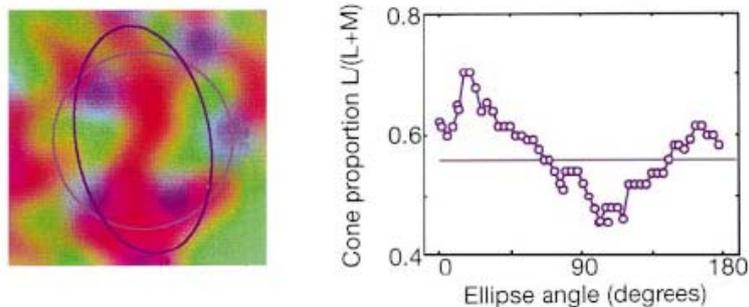


Abbildung 6.5: Vergleich runder und elliptischer Rezeptiver Felder: Verhältnis zwischen L und L+M als Funktion des Rotationswinkels der Ellipse (aus Martin et al., 2001).

Derrington (2001) unterscheidet in der Einteilung der Retina zwischen naher ($< 50^\circ$) und ferner Retina ($> 50^\circ$). Im Bereich bis 50° ist das Zentrum des rezeptiven Feldes sehr klein. Meist wird nur ein einzelner Zapfen direkt durch eine Bipolarzelle auf eine Ganglienzelle geschaltet. Trotzdem das Umfeld durch die elliptoide Form gemischten Input aus vielen L- und M-Zapfen erhält, ist immer noch ein Gegenfarbenmechanismus möglich. Auch wenn Martin et al (2001) in der nahen Retina bis 50° Exzentrizität Gegenfarbenmechanismen gefunden haben, so sind diese über 50° nicht mehr möglich, da hier bereits im Zentrum des RF verschiedene Zapfen direkt auf einzelne Bipolarzellen konvergieren.

Aber er weist auch darauf hin, dass der Widerspruch zwischen den physiologischen und den psychophysischen Daten in Martins Studie nicht vernachlässigt werden darf. Eine potentielle Erklärung wäre, dass die Information aus der nahen Retina falsch weiterverarbeitet wird. Dies wäre allerdings für die Psychophysik fatal, da sie ihre Schlussfolgerungen genau aus diesen Ergebnissen zieht. Alternativ wäre es möglich, dass sich physiologischen Daten des Affen nicht direkt mit psychophysischen Daten von Menschen vergleichen lassen. Auch das wäre problematisch, da Affen bisher als eines der besten physiologischen Modelle für den Menschen betrachtet wurden.

Die veröffentlichten Ergebnisse bleiben widersprüchlich. Während Martin et al. (2001) berichten, einen großen Anteil an Ganglienzellen in der Retina gefunden zu haben, die sensitiv gegenüber Rot-Grün-Modulation sind, berichten Diller, Packer, Verweij, McMahon, Williams & Dacey (2004), dass periphere Ganglienzellen in diesen Exzentrizitäten kein farboponentes Verhalten aufweisen.

Mullen, Sakurai und Chu (2005) untersuchten die *Zapfen-Kontrast-Sensitivität* (*cone contrast sensitivity, CCS*)¹ in Abhängigkeit von der Exzentrizität, um die physikalische Grenze zu bestimmen. Bei drei Beobachtern zeigt sich, dass die Spitzen der CCS bei rot-grünen Reizen in der Fovea am höchsten sind und zur Peripherie hin steil abfallen. Das Verhalten bei blau-gelben und achromatischen Reizen ist ähnlich, jedoch nicht ganz so hoch wie in der Fovea und folglich nicht so steil im Abfall zur Peripherie hin.

Eine Möglichkeit ist, dass eine zusätzliche Zahl räumlicher Zyklen im Stimulus die Sensitivität anhebt im Sinne einer räumlichen Summation. Im Kontrollexperiment sollte diese Möglichkeit geprüft werden. Diese Reize wurden nur bis 20° Exzentrizität gesehen. Bei 25° und 30° nahmen die Versuchspersonen sie nicht mehr wahr. Die Autoren schlussfolgern für die CCS eine Verteilung wie in Abbildung 6.6 zu sehen ist. Die Daten dieser Versuchsperson sind mittels einer Gauss-Funktion gefittet. Demnach nimmt die CCS für Rot-Grün innerhalb der jeweils innersten 5 Grad um die Fovea herum bereits stark ab.

¹ Die cone contrast sensitivity ist der reziproke Wert der Wurzel der mittleren Quadrate (root mean squared, *RMS*) des Zapfenkontrastes der L- und M-Zapfen bei der Schwelle: $RMS: [((\Delta L/L)^2 + (\Delta M/M)^2)/2]$. Hierbei sind L und M die mittleren Zapfenerregungen und ΔL und ΔM sind die Differenzen zwischen den Spitzen und den Mittelwerten der Erregung der L- und M-Zapfen (vgl. Gegenfurtner & Hawken, 1996).

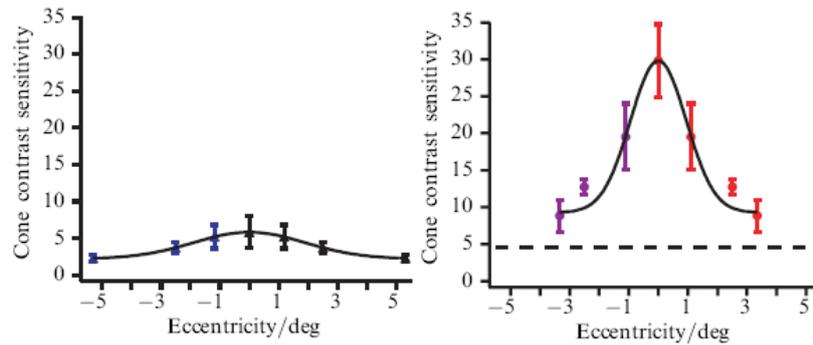


Abbildung 6.6: Cone contrast sensitivity (Mittelwert \pm SD) als Funktion der Exzentrizität eines Gabor-Patches (1.5 Cyc/deg, 0.2 deg), welcher entweder achromatisch (links) oder isoluminant rot-grün (rechts) sein kann (aus Mullen, Sakurai & Chu, 2005).

Solomon und Kollegen (2005) betrachteten sowohl Parvo-, Magno- und Koniozellen durch Einzelzellableitung in der Retina des Makaken. Sie kommen zu dem Schluss, dass die chromatische Ansprechbarkeit vom M- und K-Zellen in der Peripherie vergleichbar mit ihrem Verhalten in der Fovea ist. Die meisten peripheren P-Zellen zeigen ein farboponentes Verhalten jedoch nur bei zeitlich niederfrequenter Reizung (<10 Hz). Einige P-Zellen zeigen jedoch gar kein farboponentes Verhalten. Abgesehen von diesen Ausnahmen ist das chromatische Verhalten der Ganglienzellen innerhalb von 50° Exzentrizität im Wesentlichen erhalten. Der Hauptunterschied von fovealen Ganglienzellen zu peripheren ist, dass ihre Ansprechbarkeit zunehmend auf höherfrequente Muster ausgerichtet ist.

Die Literaturrecherche zeigt, dass widersprüchliche Ergebnisse zwischen und innerhalb physiologischer und psychophysischer Forschung konkurrieren. Im folgenden Experiment planen wir, einen Teil zur Aufklärung dieser Ergebnisse beizutragen und das fehlende Bindeglied einzufügen.

Method

Versuchspersonen

Die teilnehmenden Versuchspersonen ($n = 7$) waren alle weiblich, zwischen 21 und 28 Jahren alt und Studentinnen verschiedener Fachbereiche an der Universität Giessen. Bezahlung erfolgte je nach Dauer des Experiments. Die Versuchspersonen waren bezüglich der Fragestellungen naiv. Auch hier wurde im Vorfeld eine Anamnese durchgeführt, bei der Farbfehlsichtigkeiten, Augenerkrankungen sowie etwaige neurologische, neurogenerative, oder psychische Krankheiten ausgeschlossen wurden. Die Dauer der einzelnen Sitzungen waren so angelegt, dass 60 Minuten am Stück nicht überschritten wurden. Mindestens eine Pause wurde zur Hälfte der Zeit eingelegt.

Material

Die Reize wurden präsentiert mit einer Vision Station der Firma Elumens (Abbildung 6.7 a). In einem Tisch unter der Kinnstütze war ein Epson 730c Beamer untergebracht, der in die Hohlkugel projizierte. Kinnstütze und Beamer waren mechanisch voneinander getrennt, um Erschütterungen zu vermeiden. Vor der Beamerlinse war eine Fish-Eye-Linse montiert, die das Licht in die Hohlkugel streute (Abbildung 6.7 b). In unserem Versuchsaufbau konnten alle Teile des Gesichtsfeldes in diagonalen Richtung bis zu 50° getestet werden.

Für die Bearbeitung der Tests wurden Stuhl und Kinnstütze so eingestellt, dass sich die Augen der Versuchsperson auf Höhe des Fixationspunktes oberhalb der Mitte der Kugel befanden (Abbildung 6.7 a). Die Auflösung beträgt 1024×768 Pixel. Gesteuert wurde die Präsentation von einem Pentium Prozessor (512 MB RAM, 1.6

GHz) im Farblabor der Justus-Liebig-Universität. Der Beamer hatte laut den technischen Daten ein Geräuschlevel von 39 dB, zu deren Eindämmung den Versuchspersonen einen Gehörschutz angeboten wurde.

a)



b)



Abbildung 6.7: a) Versuchsaufbau der Vision Station in unserem Labor. Der Beamer befindet sich unterhalb der Kinnstütze. b) Fish-Eye Linse des Beamers.

Kalibrierung.

Da die Fish-Eye-Linse im Zentrum eine hellere Projektion erzeugt, die zur Peripherie hin dunkler wird, musste der Ausgangsstimulus invers erzeugt werden, um an allen Orten der Präsentation die gleiche Helligkeit zu zeigen (Abbildung 6.8). Diese Helligkeitskorrektur wurde für alle drei Farbkanäle Rot, Grün und Blau des Beamers getrennt durchgeführt. Zusätzlich musste die Präsentation räumlich angepasst werden. Die Verzerrung der Linse ließ die Stimuli zum Rand hin länglicher erscheinen, so dass aus Kreisen Ellipsen und aus Quadraten Rauten wurden. Um dieser Verzerrung entgegenzuwirken wurde das Reizmaterial am Rand komprimiert, damit sich die

Verzerrung mit der Kompression zum Ursprungseindruck aufhob. Entsprechend dem geläufigen Vorgehen wurde auch der Beamer Gamma-korrigiert.

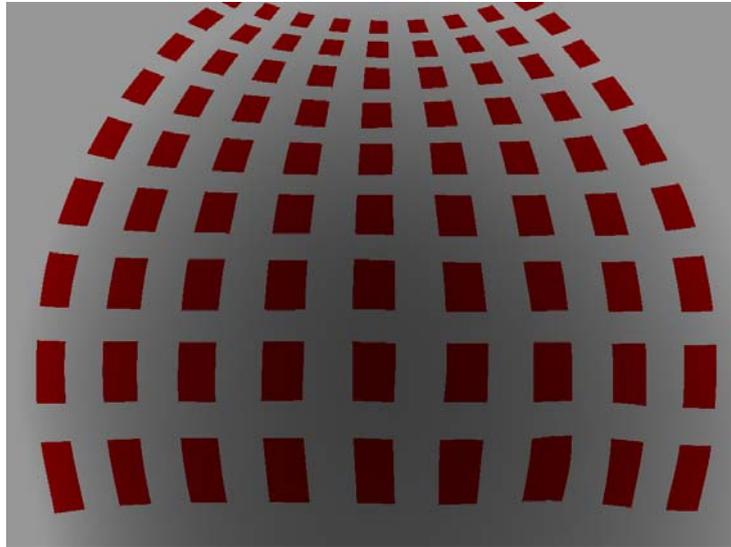


Abbildung 6.8: Beispiel für die Helligkeits- Farb- und Raumkorrektur der verwendeten Stimuli. Hier nur für den Rot-Kanal.

Stimuli

Die Farben der präsentierten Reize wurden dem DKL-Farbraum entnommen. Die Aufgabe entsprach entweder der Detektionsaufgabe (siehe dort), das heißt es sollte beantwortet werden, in welchem Quadranten ein Punkt aufgetaucht war. Alternativ gab es die Aufgabe, anzugeben was gesehen wurde, also eine Benennung über die Tastatur als „Rot“, „Grün“, „Gelb“ oder „Blau“. Bei der Benennungsaufgabe wurde vorher eine Trainingssession durchgeführt, um die Versuchspersonen an die pastellartigen Töne des DKL-Farbraumes zu gewöhnen und eine Einigung bezüglich der Farbbenennung zu erzielen. Einzig die Farbtöne, Helligkeiten und Größen der Reize wurden im Konstanzverfahren variiert. Die Sättigung wurde über eine Drei zu Eins-Staircase

ermittelt. Abbruchkriterium waren entweder sechs Umkehr-Ereignisse oder 100 absolvierte Durchgänge.

Detektionsschwellen bei Excentrizitäten bis 50°

Zur Messung der Detektionsschwellen hatten die Versuchspersonen die Aufgabe, einen farbigen Kreis mit fünf Grad Durchmesser in den Quadranten zu entdecken. Per Tastatur sollte angegeben werden, ob sich der Stimulus in dem Quadranten oben, unten, links oder rechts befand. Die Reize wurden in Schritten von zehn Grad bis 50 Grad Abstand vom Fixationspunkt präsentiert. Die Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse von sieben Beobachtern. Das Maximum für L- und M-Zapfen war ca. 8 % und etwa 75 % für S-Zapfen. Um die Reaktionen auf unterschiedliche Stimuli vergleichen zu können, wurden Antworten auf DKL-rote und -gelbe Reize mit positiven Vorzeichen und Antworten auf DKL-grüne und -blaue Reize mit negativen Vorzeichen versehen. Ausführliche Erklärungen zur Cone Contrast Sensitivity finden sich bei Gegenfurtner and Hawken (1996).

Die Rauten zeigen, dass die Schwellen mit zunehmender Exzentrität ansteigen, ohne sich zu überlappen. Dies ist Grund zur Annahme, dass es durchaus Farbwahrnehmung jenseits der angenommenen Grenze von 25° des visuellen Feldes gibt. Die Schwellen kollabieren nicht unvermittelt, sondern zeigen einen steten Anstieg sogar bis 50 Grad Sehwinkel.

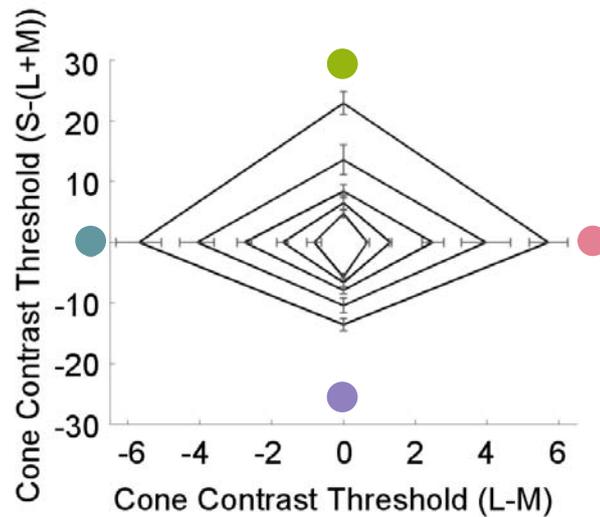


Abbildung 6.9: Schwellen von vier farbigen Stimuli. (DKL-Rot, -Grün, -Blau, -Gelb) bei fünf Exzentrizitäten (10°, 20°, 30°, 40°, 50°; dargestellt vom Zentrum zu den Rändern).

Wir testeten Stimuli unterschiedlichen Durchmessers bei verschiedenen Exzentrizitäten und kamen zu dem Schluss, dass Reize von acht Grad Durchmesser an allen getesteten Abständen gesehen werden können ($N = 3$). In der Abbildung 6.10 wurden von Mullen & Kingdom (2002) veröffentlichte Daten ergänzt (gestrichelte Linie). Ihre Ergebnisse zeigen den drastischen Abfall des L-M Gegenfarbenverhaltens und einen gemäßigeren Abfall bei S-(L+M)-Mechanismen und achromatischen Reizen. Ihre Daten zeigen jedoch nur des Verhalten für die ersten 20 Grad. Wir näherten uns in unserer Messung den Exzentrizitäten jenseits dieser Grenze und konnten zeigen, dass unserer Ergebnisse die bekannten Daten ergänzend weiterführen. Die Werte von Mullen und Kingdom stellen den Anfang eines Kontinuums dar, das in die Peripherie erweitert werden kann.

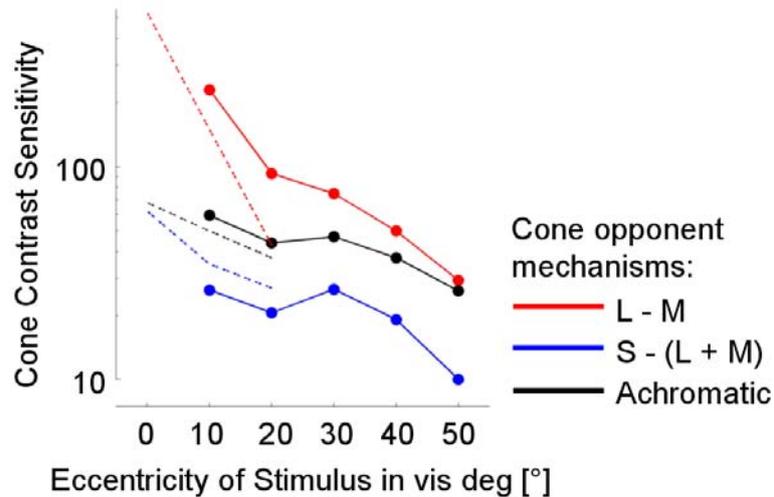


Abbildung 6.10: Daten von Mullen & Kingdom (2002), gestrichelte Linie, werden von unseren Daten unterstützt und weitergeführt (Kreise). Die Abszisse zeigt die getesteten Exzentrizitäten. Die Ordinate zeigt, logarithmisch skaliert, die Cone Contrast Sensitivity als reziproke Schwellenwerte.

Die entscheidende Voraussetzung für Messungen mit der von uns kalibrierten Apparatur ist, dass dem Entdecken ein farbverarbeitender Mechanismus zugrunde liegt. Um dies sicher zu klären, führten wir drei Kontrollexperimente durch: Vergleich von Entdecken und Benennen, Erstellen der Detektionskontur und der Diskriminationskontur.

Detektion und Identifikation

Zuerst verglichen wir die Leistungen zwischen dem Entdecken und dem Benennen farbiger Reize. Würden Reize zwar entdeckt, aber nicht benannt werden können, so könnte das Entdecken auf andere als farbverarbeitende Mechanismen zurückgeführt werden. Im Fall einer engen Beziehung zwischen beiden Aufgaben müsste Benennen ebenso bei großen Abständen zum Zentrum möglich sein.

Wir führten die Farbbenennungsaufgabe für die Exzentrizitäten 10° und 50° durch und vergleichen diese mit den Daten aus dem vorangegangenen Experiment zum Entdecken. So konnten wir prüfen, ob in der fovea-nächsten Bedingung und einer Bedingung hoher Exzentrizität Unterschiede in den Schwellenverteilungen vorlagen (Abbildung 6.11). Die Schwellen sind nahezu deckungsgleich. Die Fehlerbalken veranschaulichen, dass keine bedeutsamen Unterschiede zwischen den beiden Aufgabentypen vorliegen.

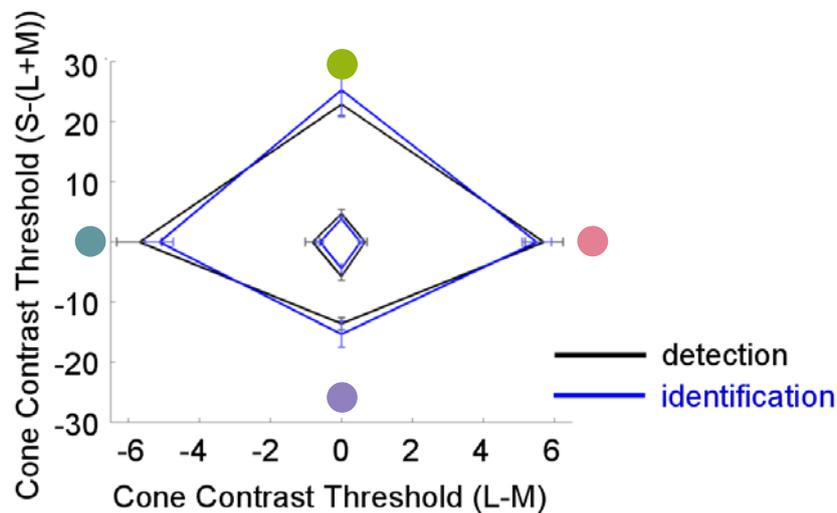


Abbildung 6.11: Vergleich zwischen den Schwellen bei 10° (innere Raute) und 50° (äußere Raute) abgetragen als jeweilige Zapfenkontrastsensitivität. Schwarz = Detektion, Blau = Farbbenennung. Durchmesser des Stimulus = 5° . Schwellenwerte für sieben Beobachter. Die Skalierung ist identisch mit Abbildung 6.9.

Detektionskontur

In einem weiteren Experiment bildeten wir die Detektionskontur bei Reizen leicht veränderter Helligkeit ab. Hierzu präsentierten wir Stimuli, die auf der isoluminaten L-M-Achse lagen, farbige Reize, die leichte Variationen in der Helligkeit hatten (Elevation: 0.5° , 1° , 2° , 3° , 4° , 5°) und solche, die auf der L+M-Achse lagen, also

achromatisch waren. Die Stimuli maßen 5° im Durchmesser bei Distanzen von 5° und 30° . Bei der Exzentrizität von 5° waren die Reize folglich foveal um den Fixationspunkt präsentiert. Bei der Messungen mit 50° Abstand zum Zentrum maßen die Reize 8° im Durchmesser. Die Abbildung 6.12 illustriert die Ergebnisse in dem Farbraum, der von den Kontrasten lang- und mittelwelliger Zapfen aufgespannt wird (Gegenfurtner & Hawken, 1996). Für die Helligkeitsreize sind die Kontraste von gleicher Größe mit gleichem Vorzeichen und ergeben deshalb eine Diagonale mit einer Steigung von eins. Bei isoluminanten Stimuli wird jeder Anstieg in L-Zapfen-Erregung mit einer Abnahme der M-Zapfen-Erregung ausgeglichen. Deshalb führen die Zapfenantworten zu unterschiedlichen Vorzeichen und ergeben eine negative Steigung. Zugrunde liegende Prozesse würden im Fall von Gegenfarbenverhalten zu einer Verschiebung der Verteilung parallel zur Luminanzachse führen, während sich im Fall von Helligkeitsprozessen die Punkteverteilung parallel zur chromatischen Achse anordnen würde.

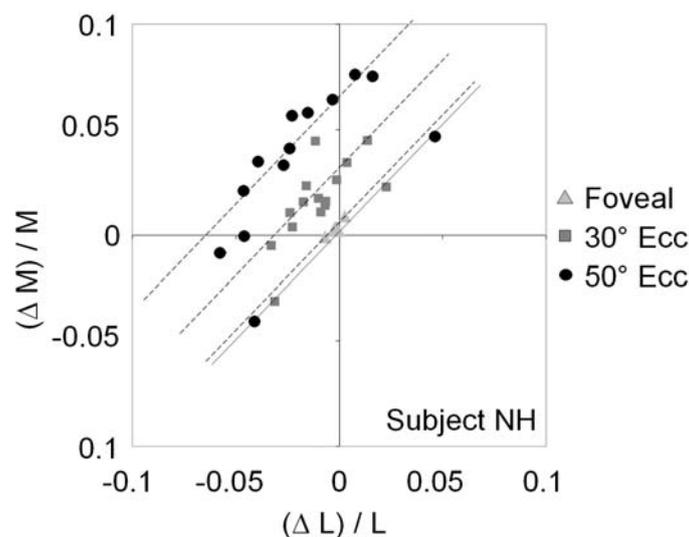


Abbildung 6.12: Psychophysische Detektionskonturen im Cone-Contrast-Space für eine Versuchsperson. Die Stimuli wurden im Abstand von 5° , 30° und 50° präsentiert. Die Schwellen werden angegeben durch den Abstand zum Ursprung und sind kleiner für isoluminante Stimuli (negative Diagonale) als für Luminanzreize (positive Diagonale).

Die Schwellenwerte sind am geringsten in der isoluminanten Direktion. Bemerkenswert ist, dass die gemessene Kontur parallel zur Luminanz-Richtung verläuft. Tatsächlich ist in den gemessenen Daten zu sehen, dass eine Erhöhung der Schwelle der L-Erregung mit einer verminderten Schwelle der M-Erregung beantwortet wird. Folglich ist der der Detektion zugrunde liegende Mechanismus farboponent. Das gleiche farboponente Verhalten lässt sich sowohl bei 5° Exzentrizität als auch bei 30° und 50° messen.

Diskriminationskontur

Krauskopf und Gegenfurtner (1992) zeigten, dass bei Farbunterscheidungs-aufgaben in der Fovea die Diskriminationskonturen elliptische Formen annehmen. Diese Ellipsen sind entlang der Farbachse orientiert, entlang derer gemessen wird. Das bedeutet, dass die Schwellen höher sind, wenn innerhalb der gleichen Farbe Sättigungsunterschiede entdeckt werden sollen, als wenn Farbtönen gegeneinander verglichen werden sollen. Wir replizierten diese Ergebnisse in unserem Versuchsaufbau mit der gleichen Aufgabe und ebenfalls in der Fovea. Die Versuchspersonen sollten angeben, welcher von vier Kreisen sich von den drei anderen unterschied. Wir testeten vier Richtungen mit acht Testvektoren um den energiegleichen Adaptationspunkt im DKL-Raum mit einer Test-Sättigung von 50%. Die Vergleichs-Stimuli hatten einen Durchmesser von 8° und konnten entweder im Farbton oder in der Sättigung variieren.

Die Abbildung 6.13 zeigt die Ergebnisse. Wir fitteten unabhängige Ellipsen an die acht Datensätze. Die Ausrichtung der Ellipsen entspricht vorangehenden Studien und validiert unseren Versuchsaufbau. Die resultierende Fragestellung ist, ob in der Peripherie ähnliche Diskriminationsmuster auftreten oder ob es hier Unterschiede gibt.

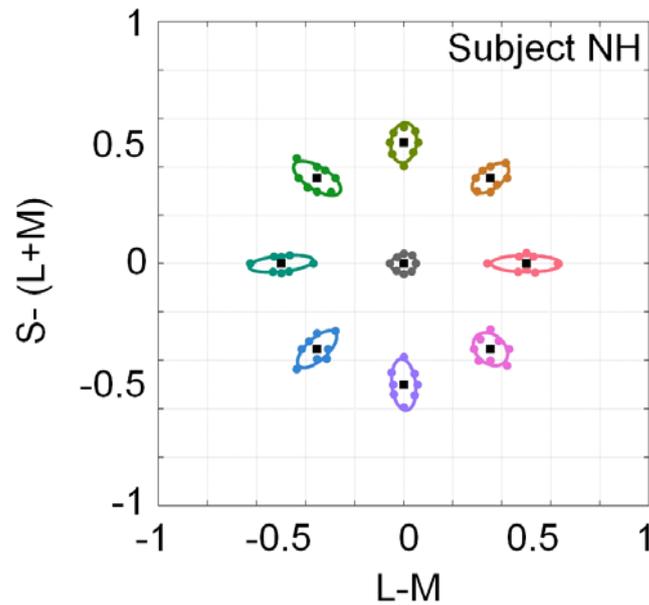


Abbildung 6.13: Diskriminationsellipsen bei fovealer Präsentation für acht Testvektoren in gleichem Abstand um den Weißpunkt. Der Adaptationspunkt war ein mittleres Grau. Die anthrazitfarbene Ellipse zeigt die Detektionskontur.

Ein Kontrollexperiment sollte zeigen, dass auch eine Diskriminationskontur bei 50° Exzentrizität gemessen werden kann (vgl. Krauskopf & Gegenfurtner, 1992). Die Abbildung 6.14 zeigt die Schwellenwerte der acht Testfarben. Alle Konturen zeigen erheblich größere Schwellen als in der Fovea. Nur die Konturen entlang der L-M Achse entsprechen jenen, die in der Fovea erwartet werden. Die elongierten Ellipsen bei roten und grünen Testreizen zeigen, dass es bei diesen Farben schwieriger ist, unterschiedliche Sättigungen zu diskriminieren als verschiedene Farbtöne. Hingegen zeigen die Konturen der anderen Richtungen eher eine zirkuläre Formen und weisen darauf hin, dass Unterscheidungen zwischen Farbsättigungen ebenso schwierig sind wie Unterscheidungen zwischen Farbtönen.

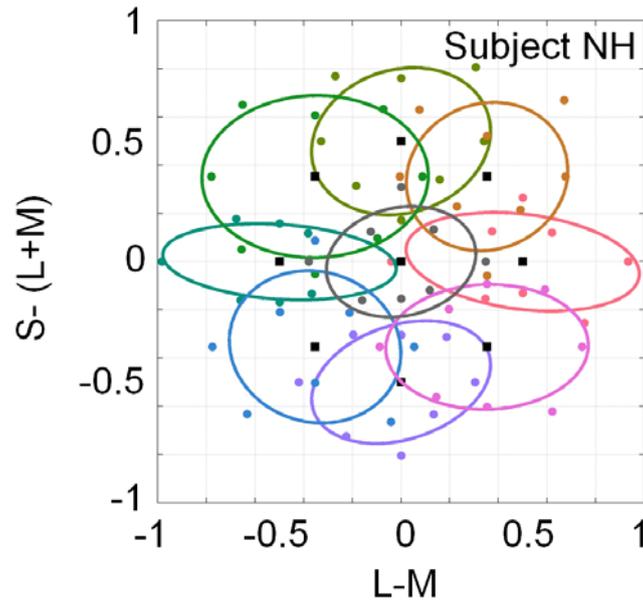


Abbildung 6.14: Diskriminationsellipsen präsentiert bei 50° Exzentrizität für acht Testvektoren in gleichem Abstand um den Weißpunkt. Der Adaptationspunkt war ein mittleres Grau. Die anthrazitfarbene Ellipse zeigt die Detektionskontur.

Diskussion

In Übereinstimmung mit vorangegangenen Studien ergaben unsere Untersuchungen, dass der Abfall an Sensitivität für rot-grüne Reize stärker ist als für blau-gelbe. Es muss ergänzt werden, dass der Bereich, in dem Farbwahrnehmung möglich ist, größer ist als bisher angenommen. Farbige Reize können bis mindestens 50° mittels chromatisch opponenter Mechanismen zuverlässig entdeckt und identifiziert werden.

Frühere Studien unterschätzten bisher diesen Bereich. Möglicherweise beinhalteten früher Messungen Artefakte aufgrund technischer Beschränkungen und dem Gebrauch flacher Projektionsflächen. Unsere Ergebnisse sind kohärent mit früheren Studien zur Einzelzelleableitung in der retinalen Peripherie. Wir unterstützen die Annahme, dass der Input peripherer rezeptiver Felder nicht völlig zufällig verschaltet wird.

Die Detektionskontur zeigt, dass das Entdecken farbiger Reize bis in die retinale Peripherie durch farboffene Mechanismen unterstützt wird. Hierbei nimmt jedoch die Schwelle der Detektionsleistung stetig zu. Ebenso steigt die Schwelle für die Benennung von Farben. Farbbenennung bleibt jedoch ebenfalls bis 50° erhalten, wenn die Reize in ausreichender Größe präsentiert werden. Die Größe der Reize ist relevant, um den zunehmend großen dendritischen Bäumen und Abständen zwischen den Zellen in der Netzhautperipherie gerecht zu werden.

Die Darstellung der Diskriminationskontur zeigt, dass die menschliche Retina durchaus Farbunterscheidungsleistungen bis 50° vollbringen kann. In der Farbunterscheidung finden sich nicht nur Schwellenunterschiede zwischen Fovea und Peripherie, sondern auch funktionale Unterschiede. Während in der Fovea die Unterscheidung von Farbtönen einfacher ist als die Unterscheidung von Farbsättigungen, trifft dies in der Peripherie nur für Reize der L-M-Achse zu. Für alle anderen Farbdirektionen scheint die Sensitivität für Farbsättigungsunterschiede ebenso gering zu sein wie für Farbtonunterschiede.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die verbreitete Meinung, dass Farbwahrnehmung zur Peripherie hin schlechter wird, pauschal nicht haltbar ist. Auch hier müssen Teilleistungen betrachtet werden. So bleibt das Detektionsvermögen bei ausreichender Größe der Stimuli bis 50° Exzentrizität erhalten, ebenso wie das Benennen der Farbkategorien. Einzig das Unterscheiden von Farbtönen außerhalb der L-M-Farbachse scheint eine geringere Sensitivität aufzuweisen. Möglicherweise ist eine Unterscheidung von Farbtönen in der Peripherie evolutionär nicht relevant.

Zusammenfassende Diskussion

Die vorliegende Arbeit behandelt die Frage nach einem Farbzentrum im Gehirn und weist darauf hin, dass bisher diskutierte Areale wie V4 durchaus ihre Beteiligung am farbverarbeitenden Prozess haben, aber nicht ein alleiniges Farbzentrum bilden. In der Läsionsanalyse findet sich wiederholt ein Überlappungsbereich, der auf die Region V4 hinweist, die in der Literatur als Farbzentrum benannt wird. Auch wenn es sich hier nicht um ein exklusiv farbverarbeitendes Zentrum handelt, so lässt sich in Betracht ziehen, dass es anteilig am farbverarbeitenden Prozess beteiligt ist und sei es nur weiterleitend oder umschaltend. Einige Patienten, die Defizite in der Farbkonstanz zeigen, haben beschreibbare unilaterale Läsionen, die bedeutsam anterior und temporal des lingualen und fusiformen Gyrus liegen und somit dicht an der Insula im Sulcus lateralis. Bei selektiv exklusiven Störungen der Diskriminierungsleistung finden wir Läsionen im parietal-inferioren Bereich am Übergang zum Occipitallappen. Bei Schwierigkeiten in der Kategorisierungsaufgabe scheint keine Systematik hinter der Läsionsverteilung zu stehen.

Die Läsionsanalysen der Patienten mit neurologischen Ausfällen zeigen, dass Teilleistungen der Farbwahrnehmung separat ausfallen können. Wir unterstützen daher die Ansicht, dass Farbwahrnehmung kein eigenständiges Konstrukt ist, sondern auf Interaktion funktioneller Teilleistungen beruht, die durch die Plastizität und Interkonnektivität des Kortex separat beeinträchtigt sein können. Unsere Ergebnisse des aus der Literatur bekannten Achromatopsiepatienten M.S. zeigen, dass in Transparenzaufgaben eine residuale Fähigkeit zur Farbkonstanz erhalten geblieben ist. Vergleich, Benennung und Matching von Farben sind ihm jedoch in unseren Aufgabenstellungen nicht möglich.

Der Bereich der Retina, in dem Farbwahrnehmung möglich ist, ist größer als bisher angenommen. Farbige Reize können bis mindestens 50° Exzentrizität mittels chromatisch opponenter Mechanismen zuverlässig entdeckt und identifiziert werden, wenn sie groß genug sind. Die Größe der verwendeten Stimuli ist entscheidend, um den großflächigen dendritischen Verschaltungen der Netzhautperipherie gerecht zu werden. Auch in diesen Experimenten müssen die Leistungen der Versuchsperson in Detektion, Kategorisierung und Diskrimination unterteilt werden. Detektion und Kategorisierung farbiger Stimuli sind bei adäquatem Reizmaterial bis weit in die Peripherie erhalten. Die Schwellen steigen von der Fovea zur Peripherie stetig an. In der Farbunterscheidung finden sich nicht nur Schwellenunterschiede zwischen Fovea und Peripherie, sondern auch funktionale Unterschiede. Während in der Fovea die Unterscheidung von Farbtönen einfacher ist als die Unterscheidung von Farbsättigungen, trifft dies in der Peripherie nur für Reize der L-M-Achse zu. Für alle anderen Farbdirektionen scheint die Sensitivität für Farbsättigungsunterschiede ebenso gering zu sein wie für Farbtonunterschiede. Auch in diesen Untersuchungen zur retinalen Peripherie darf nicht pauschal von einer Befähigung oder Unfähigkeit zur Farbwahrnehmung ausgegangen werden. Vielmehr müssen auch hier Teilleistungen eruiert werden, die sich unabhängig voneinander verhalten können.

Literaturverzeichnis

- Abramov, I., Gordon, J. & Chan, H. (1991). Color appearance in the peripheral retina: effects of stimulus size. *Journal of the Optical Society of America*. 8 (2):404-14.
- Bartels, A. & Zeki, S. (2000): The architecture of the colour centre in the human visual brain: new results and a review. *European Journal of Neuroscience*, 12, 172–193.
- Birbaumer, N. & Schmidt, R.F. (1999). *Biologische Psychologie*. Springer-Verlag: Berlin.
- Bouvier, S.E. & Engel, S.A. (2006). Behavioral deficits and cortical damage loci in cerebral achromatopsia. *Cerebral Cortex* 2, 183–191.
- Brainard, D.H., Roorda, A., Yamauchi, Y., Calderone, J.B. & Metha, A. (2000). Functional consequences of the relative numbers of L and M cones. *Journal of the Optical Society of America A*. 17(3), 607– 614
- Braun, D.I., Pracejus, L. & Gegenfurtner, K.R. (2006). Motion aftereffect elicits smooth pursuit eye movements. *Journal of Vision*, 6, 671-684.
- Clarke, S., Walsh, V., Schoppig, A., Assal, G. & Cowey, A. (1998) Colour constancy impairments in patients with lesions of the prestriate cortex. *Exp. Brain Research*, 123, 154-158.
- Clavadetscher, J.E., Brown, A M., Ankrum, C. & Teller, D.Y. (1988). Spectral sensitivity and chromatic discriminations in 3- and 7-week-old human infants. *Journal of the Optical Society of America*. Vol. 5. 2093-2105.
- Cole, G.G; Heywood, C.A.; Kentridge, R.W.; Fairholm, I. & Cowey, A. (2003) Attentional capture by colour and motion in cerebral achromatopsia. *Neuropsychologia* 41, 1837-1846.

-
- Cowey, A., & Heywood, C.A. (1995). There's more to colour than meets the eye. *Behavioural Brain Research*, 71, 89–100.
- Cowey, A. & Heywood, C.A. (1997). Cerebral achromatopsia: colour blindness despite wavelength processing. *Trends in Cognitive Science*, 1(4): 133-139.
- Cowey, A., Heywood, C. A. & Irving-Bell, L. (2001) The regional cortical basis of achromatopsia: a study on macaque monkeys and an achromatopsic patient. *European Journal of Neuroscience*, 14 (9), 1555-1566.
- Derrington, A. (2001). Why do colours fade at the edges? *Nature*, 410: 886-887.
- Derrington, A.M, Krauskopf, J. & Lennie, P. (1984). Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *Journal of Physiology*, 357, 241-265.
- DeValois, R.L. (1965). Analysis and coding of color vision in the primate visual system. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 30, 567–579.
- Diller, L., Packer, O.S., Verweij, J., McMahon, M.J., Williams, D.R. & Dacey, D.M. (2004). L and M cone contributions to the midget and parasol ganglion cell receptive fields of macaque monkey retina. *Journal of Neuroscience*, 24, 1079 - 1088
- Elsner, A.E., Berk, L., Burns, S.A. & Rosenberg P.R. (1988). Aging and human cone photopigments. *Journal of the Optical Society of America*, 5, 2106-2112.
- Eysel, U. (2003). Farbensehen. In: Lehrbuch der Physiologie (Klinke, R. & Silbernagl, S.), 628-631. Stuttgart: Thieme.
- Gegenfurtner, K.R. (2003) Cortical mechanisms of colour vision. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 563-572.
- Gegenfurtner, K.R. & Hawken, M.J. (1996) Interactions between color and motion in the visual pathways. *Trends in Neurosciences*, 19, 394-401.

-
- Gegenfurtner, K.R. & Kiper, D.C. (2003) Color vision. *Annual Review of Neuroscience*, 26, 181-206.
- Gegenfurtner, K.R. & Rieger, J. (2000) Sensory and cognitive contributions of color to the perception of natural scenes. *Current Biology*, 10, 805-808.
- Golz, J. & MacLeod, D.I.A. (2003). Colorimetry for CRT displays. *Journal of the Optical Society of America*, 20, 769-781.
- Gouras, P. (1968) Identification of cone mechanisms in monkey ganglion cells. *Journal of Physiology*, 199, 533-547.
- Grassman, H. (1853). Zur Theorie der Farbenmischung. *Poggendorf's Annalen Physik Chemie*, 89, 69–84.
- Gross, C.G., Rocha-Miranda, C.E. & Bender, D.B. (1972). Visual properties of neurons in inferotemporal cortex of the macaque. *Journal of Neurophysiology*. 35, 96–111.
- Grüsser, O.J. & Landis, T. (1991). Visual agnosias and other disturbances of visual perception and cognition. London: The Macmillan Press.
- Heywood, C. A. & Cowey, A. (1998). With color in mind. *Nature Neuroscience*, 1, 171–173.
- Heywood, C. A. & Cowey, A. (2003). Colour vision and its disturbances after cortical lesions. In M. Fahle & M. Greenlee (Hrsg.) *The Neuropsychology of Vision*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Heywood, C.A., Cowey, A. & Newcombe, F. (1991). Chromatic discrimination in a cortically colour blind observer. *European Journal of Neuroscience*, 3, 802-812
- Heywood, C.A., Gaffan, D. & Cowey, A. (1995). Cerebral achromatopsia in monkeys. *European Journal of Neuroscience*, 7, 1064-1073.

-
- Heywood, C.A. & Kentridge, R.W. (2003). Achromatopsia, color vision, and cortex. *Neurological Clinics of North America*, 21, 483-500.
- Heywood, C.A., Kentridge, R.W. & Cowey, A. (1998a). Cortical color blindness is not 'blindsight for color'. *Consciousness and Cognition*, 7, 410-423.
- Heywood, C.A., Kentridge, R.W. & Cowey, A. (1998b). Form and motion from colour in cerebral achromatopsia. *Experimental Brain Research*, 123, 145-153.
- Heywood, C.A., Nicholas, J.J. & Cowey, A. (1996). Behavioural and electrophysiological chromatic and achromatic contrast sensitivity in an achromatopsic patient. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 61, 638-643.
- Hilber, K. (2006). *Wovon hängt Farbkonstanz ab? Eine Studie zur Farbwahrnehmung*. Justus-Liebig-Universität Giessen: Unveröffentlichte Semesterarbeit.
- Hubel, D.H., Livingstone, M.S., (1987). Segregation of form, color and stereopsis in primate area 18. *Journal of Neuroscience*, 7, 3378-3415.
- Ishihara, S. (1917) Series of Plates Designed as Tests for Colour-blindness. Tokyo.
- Jacobs, G.H. (1993). The distribution and nature of colour vision among the mammals. *Biological Review*, 68, 413-471.
- Johnson, C.A., Adams, A.J., Twelker J.D. & Quigg, J.M. (1988). Age-related changes in the central visual field for short-wavelength-sensitive pathways. *Journal of the Optical Society of America*, 5, 2131-2139.
- Kahle, W. & Frotscher, M. (2001). *Taschenatlas der Anatomie*, 3. Georg Thieme Verlag: Stuttgart, New York.

-
- Karnath, H.O., (2002). Neglect. In W. Hartje & K. Poeck (Hrsg.) *Klinische Neuropsychologie*. Stuttgart. Thieme.
- Kentridge R.W., Heywood, C.A. & Cowey, A (2004). Chromatic edges, surfaces and constancies in cerebral achromatopsia. *Neuropsychologia*, 42, 821-830.
- Kerkhoff, G., Schaub, J. & Zihl, J. (1990). Die Anamnese zerebral bedingter Sehstörungen. *Nervenarzt*, 61, 711–718.
- Klinke, R. & Silbernagl, S. (1994). *Lehrbuch der Physiologie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- König, A. & Dieterici, C. (1886). Die Grundempfindungen und ihre Intensitätsvertheilung im Spektrum. *Sitzungsbericht der Akademie der Wissenschaften*. Berlin: 805–829.
- Komatsu, H., Ideura, Y., Kaji, S. & Yamane, S. (1992). Color selectivity of neurons in the inferior temporal cortex of the awake macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, 12, 408–424
- Kraft, J.M. & Brainard, D.H. (1999). Mechanism of color constancy under nearly natural viewing. *The National Academy of Sciences*, 96, 307-312.
- Krauskopf, J. & Gegenfurtner, K. R. (1992) Color discrimination and adaptation. *Vision Research*, 32, 2165-2175.
- Krauskopf, J., Williams, D.R. & Heeley, D.V.W. (1982). Cardinal directions of color space. *Vision Research*, 22, 1123-1131.
- Lindsey, D.T. & Brown, A.M. (2002). Color naming and the phototoxic effects of sunlight on the eye. *Psychological Science*, 13, 506-512.

-
- Lindsey, D.T., & Brown, A.M. (2004). Sunlight and "Blue": the prevalence of poor lexical color discrimination within the "grue" range. *Psychological Science, 15*, 291-294.
- Lueck, C.J., Zeki, S., Friston, K.J., Deiber, M.-P., Cope, P., Cunningham, V.J., Lammertsma, A.A., Kennard, C. & Frackowiak, R.S.J. (1989). The colour centre in the cerebral cortex of man. *Nature, 340*, 386–389.
- Magnussen S., Spillmann L., Sturzel F. & Werner J.S. (2004). Unveiling the foveal blue scotoma through an afterimage. *Vision Research, 44 (4)*, 377-383
- Martin, P.R., Lee, B.B., White, A.J., Solomon, S.G. & Rüttiger, L. (2001) Chromatic sensitivity of ganglion cells in the peripheral primate retina. *Nature, 410 (6831)*, 933-936.
- Mausfeld, R. J. (1998). Color perception: From Grassmann codes to a dual code for object and illumination colours. In W.G.K. Backhaus, R. Kliegl, & J.S. Werner (Hrsg.) *Color perception: Perspectives from different disciplines*. Berlin: Walther de Gruyter.
- Meadows, J.C. (1974). Disturbed perception of colours associated with localized cerebral lesions. *Brain, 97*, 615-632.
- Merigan, W.H. (1993). Human V4? *Current Biology, 3*, 226-229.
- Mesulam, M. (1985). Attention, confusional states, and neglect. In M. Mesulam (Hrsg.) *Principles of Behavioral Neurology*. Philadelphia, Pa: FA Davis Co, 125-168.
- Metelli, F. (1970). An algebraic development of the theory of perceptual transparency. *Ergonomics, 13*, 59–66.
- Metelli, F. (1974a). Achromatic color conditions in the perception of transparency. In R.B. MacLeod & H.L. Pick (Hrsg.), *Perception: Essays in honor of J. J. Gibson*. Ithaca, New York: Cornell University Press.

-
- Metelli, F. (1974b). The perception of transparency. *Scientific American*, 230, 90–98.
- Metelli, F. (1985). Stimulation and perception of transparency. *Psychological Research*, 47, 185–202.
- Metelli, F. (1987). Die Wahrnehmung von Durchsichtigkeit. In *Wahrnehmung und visuelles System*, 150-157. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft.
- Milner, A.D. & Goodale, M.A. (1995). *The Visual Brain in Action*. Oxford: University Press.
- Mollon, J.D. (1989). “Tho’ she kneel’d in that place where they grew...”The uses and origins of primate colour vision. *Journal of Experimental Biology*, 146, 21-38.
- Mollon, J.D. (2003). The origins of modern color science. In S.K. Shevell (Hrsg.), *The Science of Color*, 1-40. Oxford, UK: Elsevier.
- Mollon, J.D., Newcombe, F., Polden, P.G. & Ratcliffe, G. (1980). On the presence of three cone mechanisms in a case of total achromatopsia. In G. Verriest (Hrsg.) *Colour vision deficiencies*, 5, Bristol, UK: Hilger
- Mullen K.T. & Kingdom F.A. (1996). Losses in peripheral colour sensitivity predicted from "hit and miss" post-receptoral cone connections. *Vision Research*, 36 (13), 1995-2000.
- Mullen, K.T. & Kingdom, F.A. (2002). A differential distribution of red-green and blue-yellow colour vision across the visual field: evidence for different rules of connectivity? *Visual Neuroscience*, 19, 1-10.
- Mullen, K.T. & Losada, M.A. (1999). The spatial tuning of color and luminance peripheral vision measured with notch filtered noise masking. *Vision Research*, 39, 721-731.

-
- Mullen K.T., Sakurai M. & Chu W. (2005). Does L/M cone opponency disappear in human periphery? *Perception*, 34 (8), 951-9.
- Noorlander, C., Koenderink, J. J., den Ouden, R. J. & Edens, B. W. (1983). Sensitivity to spatiotemporal colour contrast in the peripheral visual field. *Vision Research*, 23, 1-11.
- Newton, I. (1730). *Opticks*. London: William Innys. 4. Auflage. Reprint New York: Dover, 1952.
- Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97–113.
- Osterberg, G. (1935) Topography of the layer of rods and cones in the human retina. *Acta Ophthal*, 6, 1-103.
- Pelli, D.G., Robson, J.G. & Wilkins, A.J. (1988). The design of a new letter chart for measuring contrast sensitivity. *Clinical Vision Sciences*, 2, 187-199.
- Polyak, S. (1957). *The Vertebrate Visual System*. University Chicago Press: Chicago.
- Rinner, O. & Gegenfurtner, K.R. (2002). Cone contributions to colour constancy. *Perception*, 31, 733-746.
- Rizzo, M., Nawrot, M., Blake, R. & Damasio, A. (1992). A human visual disorder resembling a V4 lesion in monkey. *Neurology*, 42, 1175-1180.
- Rorden, C. & Brett, M. (2001). Stereotaxic display of brain lesions. *Behavioural Neurology*, 12, 191-200.
- Rushton, W.A.H. (1972). Visual pigments in man. In H.J.A. Dartnall (Hrsg) *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/1. *Photochemistry of Vision*. New York: Springer Verlag.

-
- Rüttiger, L., Braun, D.I., Gegenfurtner, K.R., Petersen, D., Schönle, P. & Sharpe, L.T. (1999) Selective colour constancy deficits after unilateral brain lesions. *Journal of Neuroscience*, 19, 3094-3106.
- Samelson, J. (1881). Zur Frage des Farbsinnzentrums. *Centralblatt für medizinische Wissenschaften*, 19, 850-853.
- Schein, S. & Desimone, R. (1990). Spectral properties of V4 neurons in the macaque. *Journal of Neuroscience*, 10, 3369-3389.
- Schober, H. (1960). *Das Sehen*. Leipzig: VEB Fachbuch-Verlag.
- Seidl, F. (2005). *Ist mein Rot gleich dein Rot? Eine Studie zur Farbwahrnehmung im Altersvergleich*. Justus-Liebig-Universität Giessen: Unveröffentlichte Semesterarbeit.
- Sharpe, L.T., Stockman, A., Jägle, H., Nathans, J. (1999). Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness. In K.R. Gegenfurtner & L.T. Sharpe (Hrsg.) *Color vision: From Genes to Perception*, New York: Cambridge University Press
- Shevell, S.K., (2003). *The science of color*. Oxford: Elsevier.
- Singh, M. & Anderson, B. (2002). Toward a perceptual theory of transparency. *Psychological Review*, 109, 492-519.
- Smith, V.C., Pokorny, J. & Diddie, K.R. (1988). Color matching and the Stiles-Crawford effect in observers with early age-related macular changes. *Journal of the Optical Society of America*, 5, 2113-2121.
- Solomon, S., Lee, B., White, A., Rüttiger, L. & Martin, P. (2005). Chromatic organization of ganglion cell receptive fields in the peripheral retina. *The Journal of neuroscience*; 25, 4527-4539

-
- Stockman, A. & Sharpe, L.T. (2000). The spectral sensitivities of the middle- and longwavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*, 40(13), 1711–37
- Stromeyer, C.F., Lee, J. & Eskew, R.T. Jr. (1992) Peripheral chromatic sensitivity for flashes: A post-receptoral red-green asymmetry. *Vision Research*, 32, 1865-1873.
- Talairach, J. & Tournoux, P. (1988). *Co-Planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. Thieme: New York.
- Ungerleider, L. G. & Mishkin, M., (1982). Two Cortical Visual Systems. In D.J. Ingle, M.A. Goodale, & R.J.W. Mansfield (Hrsg.), *Analysis of Visual Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press.
- von der Lahr, M. (2006). *Studie zur Farbwahrnehmung im Wandel des Alters*. Justus-Liebig-Universität Giessen: Unveröffentlichte Semesterarbeit.
- Werner, J.S. & Steele V.G. (1988). Sensitivity of human foveal color mechanisms throughout the life span. *Journal of the Optical Society of America*, 5, 2122-2130.
- Wichmann, F.A., Sharpe, L.T. & Gegenfurtner, K.R. (2002). The contributions of color to recognition memory for natural scenes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 28, 509-520.
- Wurm, L.H., Legge, G.E., Isenberg, L.M. & Luebker, A. (1993). Color improves object recognition in normal and low vision. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 899 – 911.
- Zeki, S. (1973). Color coding in rhesus monkey prestriate cortex. *Brain Research*, 53, 422-427.
- Zeki, S. (1977). Color coding in the superior temporal sulcus of rhesus monkey visual cortex. *Proceedings of the Royal Society of London*, 197, 195-223.

Zeki, S. (1978). The cortical projections of foveal striate cortex in the rhesus monkey. *Journal of Physiology*, 277, 227-244.

Zeki, S. (1991). Cerebral akinetopsia (Visual motion blindness). *Brain*, 114, 811-824.

Zeki, S. & Marini, L. (1998). Three cortical stages of colour processing in the human brain. *Brain*, 121, 1669–1685.

Zihl, J. & von Cramon, D. (1986). *Zerebrale Sehstörungen*. Stuttgart: Kohlhammer.

Zilles, K. & Rehkämper, G. (1998). *Funktionelle Neuroanatomie - Lehrbuch und Atlas*. Springer Verlag: Berlin.

Digitale Quellen

http://webvision.med.utah.edu/	(Graphiken)
http://www.neuro-braunfels.de/	(Klinik / Kooperation)
http://www.oculus.de/	(Technische Daten des Perimeters)
http://www.elumens.com/	(Vertrieb der Vision Station)
http://www.sph.sc.edu/comd/rorden/mricro.html	(Software, Mapping der Läsionen)
http://www.bic.mni.mcgill.ca	(Montreal Neurological Institute)

Appendices

Anhang A:

AnamnesebogenUntersuchungsdaten _____
_____BIOGRAFISCHE ANAMNESEGeschlecht weiblich männlich Familienstand ledig verheiratet geschieden verwitwet Kinder []Bildungsabschluss VS/HS MR Abitur Lehre Hochschule

ausgeübter Beruf _____

MEDIZINISCHE ANAMNESE

Behandelnder Arzt / Station _____

Zeitpunkt der Schädigung _____

Med. Diagnose _____

Medikamente _____

Bildgebung _____

Bekannte Fehlsichtigkeiten /
Augenerkrankungen

_____Sehhilfen (Stärke?)

_____UNTERSUCHUNGSPROTOKOLL

EKN-Bogen	[]		<u>Farbe</u>		<u>Bewegung</u>	
Edinburgh	[]	L.Q.=	Plain	[]	Exp Motion I	[]
Mesulam	[]	Misses= ___ii/___re	Detect fov	[]	Exp Motion II	[]
Linien ½	[]		Detect per	[]	Exp Motion III	
Visus	[]	_____	Discr	[]	Exp Motion IV	[]
Stereo Fly	[]	_____ B Sek	Categ	[]	Exp Motion V	[]
Ishihara	[]	_____ / 15	Const	[]		[]
Kontrast	[]	_____ Log C S				
Perimetrie	[]					

Anhang B:

Protokollbogen für Sehschärfe, Stereosehen, Farb- und Kontrastwahrnehmung**C-Test Nahvisus Einzeloptotypen (40 cm)**

Zeile	Visus						
10	1.4	R	R	R	O	U	U
9	1.25	U	O	L	U	O	O
8	1.0	L	U	O	L	L	R
7	0.9	U	U	O	O	U	O
6	0.8	R	L	U	U	R	L
5	0.7	U	O	R	R	L	O
4	0.63	L	U	R	R	L	R
3	0.5	O	U	O	R	L	L
2	0.4	R	L	U	O	U	L
1	0.32	O	L	O	O	U	L

Mehrzahl pro Zeile richtig?

Stereotests (40 cm)

Test Kreise	Stereowinkel sec	
1	800	U
2	400	L
3	200	U
4	140	O
5	100	O
6	80	L
7	60	R
8	50	L
9	40	R

Test Tiere	Stereowinkel sec	
A	400	Katze
B	200	Kaninchen
C	100	Affe

Hausfliege	ja	nein

Farbensehen nach Ishihara (75 cm)

Tafel-Nr.	Normale Trichromaten	Rot-Grün-Gestörte	Total-Farbenblinde
1	12	12	12
2	8	3	-
3	29	70	-
4	5	2	-
5	3	5	-
6	15	17	-
7	74	21	-
8	6	nicht lesbar oder falsch	-
9	45	nicht lesbar oder falsch	-
10	5	nicht lesbar oder falsch	-
11	7	nicht lesbar oder falsch	-
12	16	nicht lesbar oder falsch	-
13	73	nicht lesbar oder falsch	-
14	meist nicht	5	-
15	meist nicht	45	-

 ≥ 13 i.O.

< 10 Störung

14/15 Anomal

Kontrast nach Pelli-Robson (85-115 cm)

Log Contrast Sens	0.00	H S Z	D S N	0.15	Log Contrast Sens
	0.30	C K R	Z V R	0.45	
	0.60	N D C	O S K	0.75	
	0.90	O Z K	V H Z	1.05	
	1.20	N H O	N R D	1.35	
	1.50	V R C	O V H	1.65	
	1.80	C D S	N D C	1.95	
	2.10	K V Z	O H R	2.25	

Mindestens 2 von 3 richtig?

Anhang C:

Protokollbogen der Entwicklungskommission für Neuropsychologie

Anamnese zerebral bedingter Sehstörungen																
Name des Patienten:	Nr.:															
Geburtsdatum :																
Untersucher :	Untersuchungsdatum :															
<p>1. Sind Ihnen seit Ihrer Erkrankung irgendwelche Veränderungen im Sehen aufgefallen? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Wenn ja, welche? _____</p> <p>Seit wann? _____</p> <p>Was ist Ihrer Meinung nach die Ursache für diese Sehstörung oder womit könnte sie zusammenhängen?</p> <p>_____</p>																
<p>2. Haben Sie seit Ihrer Erkrankung Doppelbilder? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Wenn ja, sind sie <input type="checkbox"/> vertikal <input type="checkbox"/> horizontal oder <input type="checkbox"/> schräg versetzt?</p>																
<p>3. Haben Sie Schwierigkeiten beim Lesen? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Wenn ja, welche?</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;">Worte fehlen</td> <td style="text-align: center;">Zeilenanfang auffinden</td> <td style="text-align: center;">Zeilenende auffinden</td> <td style="text-align: center;">Zeilen gehen</td> <td style="text-align: center;">Es geht nicht mehr</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">links / rechts</td> <td style="text-align: center;">fällt schwer</td> <td style="text-align: center;">fällt schwer</td> <td style="text-align: center;">verloren</td> <td style="text-align: center;">so lange</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> </tr> </table> <p>Sonstige? _____</p>		Worte fehlen	Zeilenanfang auffinden	Zeilenende auffinden	Zeilen gehen	Es geht nicht mehr	links / rechts	fällt schwer	fällt schwer	verloren	so lange	<input type="checkbox"/>				
Worte fehlen	Zeilenanfang auffinden	Zeilenende auffinden	Zeilen gehen	Es geht nicht mehr												
links / rechts	fällt schwer	fällt schwer	verloren	so lange												
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>												
<p>4.a) Haben Sie Probleme beim Ausweichen von Personen oder Gegenständen? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>b) Stoßen Sie beim Gehen/Fahren öfters an Personen oder Türrahmen an? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>Wenn ja, auf welcher Seite? _____</p>																
<p>5.a) Haben Sie Schwierigkeiten, beim Treppensteigen die Tiefe der Stufen abzuschätzen? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>b) Haben Sie Schwierigkeiten beim Greifen nach Türklinken, einer entgegengestreckten Hand oder nach einer Tasse/Glas? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p style="text-align: center;"><input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>																
<p>6. Sehen Gesichter verändert aus? ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/></p> <p>Wenn ja, <input type="checkbox"/> blässer? <input type="checkbox"/> unscharf? <input type="checkbox"/> verschwommen? <input type="checkbox"/> nicht mehr so vertraut? <input type="checkbox"/> fremdartig?</p>																

7. Blendet Sie helles Licht jetzt leichter als früher ? ja nein

8. a) Haben Sie den Eindruck, daß Ihnen jetzt alles etwas dunkler erscheint ja nein

b) Benötigen Sie mehr Licht zum Lesen ? ja nein

9. Haben Sie den Eindruck, daß Ihr Sehen nicht mehr so klar ist wie früher ? ja nein
 Wie würden Sie Ihr Sehen jetzt beschreiben? (Wie durch eine schlecht geputzte Brille, wie durch Nebel, wie durch Milchglas, verschwommen) _____
 Wann sehen Sie unklar ? Immer oder nur nach visueller Belastung (Lesen, Bildschirmarbeit) ? ja nein
 Wie lange können Sie lesen, bevor der Text unscharf wird ? _____ Minuten.

10. Erscheinen Ihnen die Farben jetzt anders als früher ? ja nein
 Erscheinen sie jetzt blasser, heller, ungewohnt/fremdartig ? _____
ja nein

11. Haben Sie vor, während oder seit Ihrer Erkrankung Lichtpunkte (Lichtblitze, Linien, Sternchen, Nebel etc.), farbige Muster oder Menschen/Szenen gesehen ? ja nein
 Was haben Sie gesehen ? _____
 Auf welcher Seite ? (Seite des Gesichtsfeldausfalles) _____
 Wie lange dauerten die Lichtblitze/Muster jeweils ? _____
 Über welchen Zeitraum haben Sie sie beobachtet ? _____
 Haben Sie den Eindruck, es handle sich um Täuschungen oder um reale Objekte ? ja nein
 Wie haben Sie auf diese Eindrücke reagiert ? _____

12. Wann haben Sie eine dieser Veränderungen zum ersten Mal bemerkt ?

13. Beurteilung der Patientenangaben durch den Interviewer
 Die Angaben sind ausreichend/angemessen wenig spezifisch unzureichend/vom Thema abweichend ?
ja nein ja nein

Anhang D:

Edinburgh Handedness Inventory

Vp. Nr.: _____

Untersuchungsdatum: _____

Name: _____

Geburtsdatum: _____

Händigkeit (The Edinburgh Inventory – 10-item-Version)Anweisung:

Bitte geben Sie an, welche Hand Sie bei den folgenden Tätigkeiten bevorzugt benutzen, indem Sie ein Kreuz (+) in die entsprechende Spalte setzen. Wenn Ihre Bevorzugung so weit geht, dass Sie nie die andere Hand benutzen – es sei denn, unter Zwang – dann machen Sie zwei Kreuze (++). In den Fällen, in denen Sie sich wirklich nicht entscheiden können, machen Sie ein Kreuz in beide Spalten.

Für manche Tätigkeiten braucht man beide Hände. In solchen Fällen ist in den Fragen die Aufgabe oder der Gegenstand genau benannt, für den die Handbewegung angegeben werden soll.

Bitte versuchen Sie, alle Fragen zu beantworten und lassen Sie nur die Felder leer, die sich auf ein Objekt oder eine Tätigkeit beziehen, für die Sie keinerlei Erfahrung haben.

		links	rechts
1.	Mit welcher Hand schreiben Sie?		
2.	Mit welcher Hand zeichnen Sie ?		
3.	Mit welcher Hand werfen Sie einen Ball?		
4.	In welcher Hand halten Sie eine Schere beim Schneiden?		
5.	In welcher Hand halten Sie die Zahnbürste beim Zähneputzen?		
6.	In welcher Hand halten Sie ein Messer, wenn Sie es ohne Gabel benutzen ?		
7.	In welcher Hand halten Sie einen Löffel während Sie z.B. eine Suppe essen?		
8.	Welche ist die obere Hand beim Fegen mit einem Besen?		
9.	In welcher Hand halten Sie ein Streichholz beim Anzünden?		
10.	Mit welcher Hand öffnen Sie den Deckel eines Kastens?		

Quotient: (R-L) / (R+L) =

Literatur: Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.

Anhang E:

Instruktionen für die Perimetrie

„Ich möchte jetzt mit diesem Gerät prüfen, ob Sie Reize in ihrem Umfeld sehen können. Ich werde für jedes Auge eine Messung vornehmen, die ungefähr 5 Minuten dauern wird.

Wir beginnen mit dem **linken** Auge.“

-POSITIONIERUNG-

„Sie sehen nun in der Mitte vier rote Punkte. Sehen Sie diese Punkte scharf?“

NEIN ⇒ KORREKTUR DURCH FLACHRANDGLÄSER, DANN WEITER MIT JA ⇒

WENN JA ⇒

„Wir beginnen nun mit einer kurzen Vormessung. Schauen Sie genau in die Mitte zwischen den vier roten Punkte. Manchmal wird dort ein heller Punkt aufleuchten. Drücken Sie bitte dann die Taste!“

FALLS WARNMELDUNG ⇒ KORREKTUR, DANN WIEDERHOLUNG

„Nun beginnt die Hauptmessung. Bitte schauen Sie wieder genau in die Mitte zwischen den vier roten Punkten. Es wird manchmal ein heller Punkt aufleuchten, entweder in der Mitte oder im Umfeld. Drücken Sie dann die Taste! Es ist wichtig, dass Sie nur dann die Taste drücken, wenn Sie einen hellen Punkt sehen. Sie werden Bewegungsgeräusche des Geräts hören, diese können aber unabhängig vom Erscheinen eines hellen Punkts sein.“

-EBENSO FÜR RECHTES AUGE-

Anhang F:

Instruktionen für die Aufgaben Detektion, Diskrimination, Kategorisierung und Hintergrundillusion

Bitte nehmen Sie sich zur Bearbeitung der folgenden Aufgaben die Zeit, die Sie benötigen. Die Reaktionszeit ist nicht wichtig und wird auch nicht gemessen.

Detektion

Im folgenden Experiment erscheint ein grauer Bildschirm mit einem Fixationspunkt in der Mitte. Ihre Aufgabe ist es, auf den Punkt zu sehen und zu beurteilen, ob die erscheinenden farbigen Punkte oben links, oben rechts, oder unten links oder rechts erschienen sind.

[Zur Abgabe Ihres Urteils benutzen Sie bitte die mit den Pfeilen gekennzeichneten Tasten für das entsprechende Viertel des Bildschirms. Die Taste „0“ kann verwendet werden um anzugeben, dass kein Punkt gesehen wurde. Der nächste Durchgang startet erst, wenn Sie erneut die Taste „0“ drücken.]

Diskrimination

Im folgenden Experiment erscheint ein grauer Bildschirm mit vier farbigen Quadraten. Ihre Aufgabe ist es, auf den Fixationspunkt zu sehen und zu beurteilen, welches der vier Quadrate sich in seiner Farbe von den anderen unterscheidet.

[Zur Abgabe Ihres Urteils benutzen Sie bitte die mit den Pfeilen gekennzeichneten Tasten für das entsprechende Viertel des Bildschirms. Die Taste „0“ kann verwendet werden um anzugeben, dass kein Kreis gesehen wurde. Falsche Antworten werden Ihnen akustisch angezeigt. Der nächste Durchgang startet erst, wenn Sie erneut die Taste „0“ drücken.]

Kategorisierung

Im folgenden Experiment erscheint auf dem Bildschirm ein großer farbiger Punkt. Die Farben sind alle in einem leichten Pastellton gehalten. Bitte nennen Sie mir die Farbe, in der sie den Punkt wahrnehmen und verwenden Sie die Urteile rot, grün, blau oder gelb. Sie können auch Urteile zwischen den Farben abgeben, um z. B. „grünliches gelb“ oder „rötliches blau“ für „violett“ zu antworten.

[Der nächste Durchgang startet erst, wenn Sie erneut die Taste „0“ drücken.]

Farbkonstanz

Im folgenden Experiment erscheinen acht farbige Quadrate. Jeweils zwei Quadrate werden aufblinken, von denen Sie das rechte so einstellen sollen, dass es dem linken entspricht. Zur Änderung der Farbe benutzen Sie bitte die markierten Tasten für Rot und Grün. Sie können über die Tasten dem rechten Quadrat die gewünschten Farben hinzufügen oder auch entfernen. Bitte benutzen Sie in diesem Fall die gegenüberliegende Farbe zur Reduktion. Z. B. verwenden sie die Taste Grün, wenn Sie weniger Rot anstreben. Sie können die Taste auch gedrückt halten um, schneller zur gewünschten Farbe zu gelangen. (...)

Es erscheinen jetzt noch einmal acht Quadrate. Bitte bearbeiten Sie die Aufgabe jetzt noch einmal zur Anpassung durch die Tasten Gelb und Blau.

[Anfänglich geschieht die Farbänderungen pro Tastendruck in größeren Schritten. Um zu einer feineren Abstimmung zu gelangen, drücken Sie auf die Taste „5“. Mit dieser Taste können Sie jederzeit zwischen großen und feinen Schritten wechseln.]

Anhang G:

Instruktionen für die Transparenzaufgabe

Bitte bearbeiten Sie die folgenden Aufgaben ruhig und sorgfältig. Die Reaktionszeit ist nicht wichtig und wird auch nicht gemessen.

Sie sehen auf der linken Seite mehrere Quadrate, von denen einige von einem Filter verdeckt sind. In allen Experimenten soll das Quadrat in der Mitte beurteilt werden, welches ganz von dem Filter verdeckt ist.

TESTDURCHGANG

CHROMATISCHE REIZE – MATCHING

Welches der sechs Quadrate rechts ergibt sich durch die Kombination aus farbigem Untergrund und Filter? In anderen Worten: Bitte beurteilen Sie, welches der Quadrate rechts genau das in der Mitte links ist. Verwenden Sie zur Abgabe Ihres Urteils die vier Pfeiltasten und die dazwischenliegenden Tasten [Versuchleiter zeigt]. Der nächste Durchgang startet erst, wenn Sie ein Urteil abgegeben haben und die „Space“-Taste drücken.

Dies ist ein Testdurchgang, der nicht aufgezeichnet wird. Die Präsentationszeit ist nur bei diesem Testdurchgang unbegrenzt. Im Folgenden möchten wir Sie bitten, die zu beurteilende Fläche links für ca. 10 Sekunden zu betrachten und mit den Antworten zu vergleichen. In dieser Zeit sind Antworten nicht möglich. Wenn der Reiz links verschwindet und nur die Antworten stehen bleiben, bitten wir Sie, sich zügig zu entscheiden.

Gibt es noch Fragen, die offen geblieben sind? [...] Das eigentliche Experiment beginnt jetzt.

LUMINANTE REIZE - MATCHING

In der folgenden Aufgabe werden Quadrate unterschiedlicher Helligkeit gezeigt. Die Aufgabe bleibt identisch: Bitte beurteilen Sie, welches der Quadrate rechts das in der Mitte links ist.

TESTDURCHGANG

CHROMATISCHE REIZE – CONSTANCY

Bitte beurteilen Sie jetzt, welche Farbe das Quadrat hinter dem Filter hat. D. h. überlegen Sie, wie die Farbe aussähe, wenn der Filter nicht da wäre und entscheiden Sie sich für eine der Antworten rechts.

Gibt es noch Fragen, die offen geblieben sind? [...] Das eigentliche Experiment beginnt jetzt.

LUMINANTE REIZE - CONSTANCY

Jetzt werden Ihnen noch einmal Quadrate unterschiedlicher Helligkeit gezeigt. Die Aufgabe bleibt identisch: Bitte beurteilen Sie, welche Helligkeit das Quadrat hinter dem Filter hat.

Anhang H:

Brief an die Oberärzte der Klinik

JUSTUS-LIEBIG-
 UNIVERSITÄT
GIESSEN



Abteilung Allgemeine Psychologie
Otto-Behaghel-Str. 10F
35394 Giessen
<http://www.allpsych.uni-giessen.de>
Tel.: 0641/99-26101
Fax: 0641/99-26119

Dipl. Psych. Jutta Billino
jutta.billino@psychol.uni-giessen.de
Tel.: 0641/99-26110
Dipl. Psych. Lars Pracejus
lars.pracejus@psychol.uni-giessen.de
Tel.: 0641/99-26103

Giessen, xx. Januar 2005

An die Oberärzte
der Neurologischen Klinik Braunfels

Patientenstudie zur Farb- & Bewegungswahrnehmung

Sehr geehrte Frau Dr. xxx, Sehr geehrter Herr Dr. xxx,

in Kooperation zwischen der Neurologischen Klinik Braunfels und den Universitäten Giessen und Marburg soll in diesem Jahr eine Patientenstudie zur Farb- und Bewegungswahrnehmung nach kortikalen Hirnläsionen durchgeführt werden. Der allgemeine Rahmen des Projektes wurde Ende letzten Jahres mit Dr. Böhm und Dr. Sünkeler abgesprochen und in der klinikinternen Fortbildung vorgestellt.

Da die Datenerhebung in den nächsten Wochen beginnen soll, treten wir heute mit der Bitte um Unterstützung an Sie heran. Falls auf Ihrer Station Patienten für die Teilnahme an unserer Studie geeignet sind, würden wir uns freuen, wenn Sie deren prinzipielle Teilnahmebereitschaft klären und eventuell bereits einen Aufklärungsbogen aushändigen könnten. Damit wir Kontakt zu den Patienten aufnehmen können, soll in der Besprechung der Oberärzte eine gesammelte Liste erstellt werden, die uns dann gefaxt wird. Falls es sich als praktikabler erweist, können natürlich auch getrennte Stations-Listen gefaxt werden.

Zu Ihrer Information enthält die vorliegende Mappe eine Übersicht über Einschlusskriterien und den Ablauf der Untersuchungen. Zudem finden Sie Aufklärungsbögen für die Patienten und Faxvorlagen für die Listen möglicher Studienteilnehmer. Schließlich haben wir Ihnen noch zwei Arbeiten beigelegt, auf die unsere Studie aufbaut.

Sollten noch Fragen offen sein oder sich im Verlauf ergeben, werden wir uns um Klärung bemühen. Über Anregungen und Kritik würden wir uns ebenfalls freuen. Wir danken schon jetzt für Ihre Unterstützung und hoffen auf eine fruchtbare Zusammenarbeit.

Mit freundlichen Grüßen

Anhang I:

Der Antrag an die Ethik-Kommission der Deutschen Gesellschaft für Psychologie

A. FORMALES

1. Bezeichnung des Vorhabens

Farb- und Bewegungswahrnehmung bei Patienten mit Hirnläsionen

2. Verantwortliche Leiter

Dipl.-Psych. Jutta Billino, Dipl.-Psych. Lars Pracejus,
Prof. Dr. Karl Gegenfurtner, Prof. Dr. Frank Bremmer, Dr. Doris Braun

3. Art und Zahl der Forschungsstellen (Institutionen):

- Abteilung Allgemeine Psychologie
Fachbereich 06 Psychologie und Sportwissenschaft, Justus-Liebig-Universität Giessen
Otto-Behaghel-Straße 10, 35394 Gießen
- Abteilung Angewandte Physik / Neurophysik
Fachbereich Physik, Philipps-Universität Marburg
Renthof 7, 35032 Marburg
- Neurologische Klinik Braunfels
Hubertusstr. 3-7, 35619 Braunfels

4. Kostenträger

Die Untersuchung stellt das Promotionsvorhaben von Frau Jutta Billino und Herrn Lars Pracejus dar. Diese Dissertationen werden über Doktoranden-Stipendien aus dem DFG-Graduiertenkolleg 885 „Gehirn und Verhalten: Neuronale Repräsentation und Handlungssteuerung“ finanziert.

5. Liegt ein Antrag gleichen Inhalts einer anderen Ethik-Kommission vor?

Nein.

B. UNTERSUCHUNGSBESCHREIBUNG

1. Theoretischer Hintergrund und Ziel der Studie

Das visuelle Sinnessystem besitzt für den Menschen in der Interaktion mit seiner Umwelt besondere Bedeutung. Neuroanatomisch spiegelt sich diese Bedeutung darin wider, dass 60 % des menschlichen Cortex an der Verarbeitung visueller Reize beteiligt sind. Studien an Menschen und anderen Primaten, die sich der neuronalen Organisation der visuellen Wahrnehmung und der funktionellen Spezialisierung des visuellen Cortex widmen, nutzen eine Vielfalt methodischer Ansätze. Zu den Untersuchungsverfahren zählen klassische Psychophysik, Neurophysiologie und ebenso moderne Bildgebungsverfahren wie fMRT

und PET. Die klinische Neuropsychologie bietet als weitere Forschungsmethode die Untersuchung von Patienten mit erworbenen Schädigungen des Gehirns. Auch wenn Läsionsstudien aufgrund der impliziten Annahme interindividuell fester Lokalisationen von Funktionen und des Problems der differentiellen Vulnerabilität methodisch nicht unkritisch zu betrachten sind, bieten sie eine unverzichtbare Ergänzung zu anderen Ansätzen. Die Untersuchung von Patienten mit Hirnläsionen ist in besonderer Weise geeignet, um funktionell notwendige anatomische Regionen zu identifizieren und Dissoziationen spezifischer Teilleistungen zu belegen (Rorden & Karnath, 2004).

In der geplanten Studie sollen durch die Untersuchung von hirngeschädigten Patienten Erkenntnisse über die Verarbeitung von Farb- und Bewegungsinformation im visuellen System gewonnen werden. Beeinträchtigungen des visuellen Systems zählen zu den häufigeren Funktionseinbußen nach erworbener Hirnschädigung (Zihl & von Cramon, 1986). Eine neuere repräsentative Studie (Kerkhoff, 2000) zeigt, dass 20 - 40 % der Patienten in neurologischen Reha-Zentren an visuell-sensorischen oder oculomotorischen Störungen leiden. 50 % dieser Patienten werden allerdings nicht diagnostiziert und in der Folge nicht behandelt. Dieses Missverhältnis beruht insbesondere darauf, dass basale sensorische Einbußen wie Gesichtsfeldausfälle gut untersucht und deren neuroanatomische Grundlagen geklärt sind, jedoch in Hinblick auf spezifischere Teilleistungen des visuellen Systems erheblicher Klärungsbedarf besteht (Zihl, 2000).

Die Fokussierung auf die Farb- und Bewegungsinformation lässt sich einerseits durch deren hohe Relevanz im Rahmen der Verarbeitung visueller Sinneseindrücke begründen. Farbe stellt eine wesentliche Teilkomponente zur Unterscheidung und Kennzeichnung von Objekten dar. Die Wahrnehmung von Bewegung ermöglicht das Verfolgen der räumlichen Position von Objekten und der eigenen Person, spielt eine wesentliche Rolle bei der Orientierung im Raum und erlaubt in bestimmten Situationen die Erkennung von Objekten. Darüber hinaus liegen für Einschränkungen der Farb- und Bewegungswahrnehmung neben vereinzelt historischen Fallberichten bereits einige Patientenstudien vor, die als Grundlage für die aktuelle Studie dienen (Schenk & Zihl, 1997; Braun et al., 1998; Rüttiger et al., 1999; Vaina et al., 2001; Battelli et al., 2003).

In Hinblick auf die Verarbeitung von Farbinformation stehen die Teilleistungen Kategorisierung, Detektion, Diskrimination und Farbkonstanz im Vordergrund. Durch die Untersuchung der Detektion und Diskrimination verschiedener Formen von Bewegungsinformation, z. B. global motion, biological motion, first- und second-order motion, wird eine Differenzierung der Mechanismen bei der Bewegungswahrnehmung angestrebt. Die Bestimmung der einzelnen Wahrnehmungsleistungen wird über psychophysische Schwellenmessungen erfolgen. Die erhobenen Schwellen sollen dann in Beziehung zu den Daten der Bildgebung gesetzt werden. Die Läsionsanalyse dient der Identifikation notwendiger Strukturen für spezifische Teilleistungen. Der quantitative Vergleich der Teilergebnisse wird die Möglichkeit bieten, aufgrund potentieller selektiver Einschränkungen der Farb- bzw. Bewegungswahrnehmung Aussagen über Dissoziationen und Wechselwirkungen zu treffen.

2. Untersuchungsmaterial

Das Untersuchungsmaterial setzt sich aus Standardverfahren und spezifischen Stimuli zusammen. In einer Voruntersuchung werden Standardverfahren zur Bestimmung der allgemeinen Sehleistung (Perimetrie,

Neglect-Screening, Visus-Test, etc.) und der Händigkeit (Edinburgh-Inventory) durchgeführt. Die Schwellenbestimmung für die verschiedenen Teilleistungen der Farb- und Bewegungswahrnehmung erfolgt über speziell für die aktuelle Studie programmierte Stimuli (farbige Flächen, Sinusgitter, Random Dot Muster, etc.). Die Stimuli werden auf einem Bildschirm dargeboten. Die Reaktionen werden über eine Tastatur erfasst, die an die möglichen körperlichen Einschränkungen von hirngeschädigten Patienten angepasst ist. Sollten die Patienten körperlich nicht in der Lage sein, die Tastatur zu bedienen, wird dies durch den Versuchsleiter erfolgen.

3. Studienteilnehmer

Als Studienteilnehmer sollen Patienten der Neurologischen Klinik in Braunfels gewonnen werden. Die Kontaktaufnahme wird über die dortigen Oberärzte erfolgen. Die Patienten sollten eine abgrenzbare uni- oder bilaterale Schädigung der occipito-parietalen oder occipito-temporalen Stromgebiete haben. Zudem sollen auch Patienten mit einer hypoxischen Hirnschädigung in die Studie eingeschlossen werden. Als Ausschlusskriterien sind festzuhalten: schwere internistische Erkrankungen, die die Belastbarkeit massiv einschränken, schwere psychische Erkrankungen, (z. B. akute Psychosen, affektive Erkrankungen), körperliche Beeinträchtigungen, die eine Teilnahme ausschließen. Die Teilnahme an der Studie erfolgt freiwillig und kann jederzeit durch die Patienten beendet werden (Aufklärungsbogen und Einwilligung siehe Anhang). Es erfolgt keine Vergütung. Die Patienten werden darüber aufgeklärt, dass die Teilnahme an der Studie keinen unmittelbaren Nutzen für ihre Rehabilitationsbehandlung besitzt. Falls eine gesetzliche Betreuung besteht, erfolgt neben der Aufklärung und Einverständniserklärung des Patienten in jedem Fall die Einbeziehung des gesetzlichen Betreuers.

4. Untersuchungsablauf

Nach Einwilligung in die Studienteilnahme sind in der Regel drei Untersuchungstermine à 60 Minuten geplant. Untersuchungsort ist die Neurologische Klinik Braunfels. Der erste Termin dient der Kontaktaufnahme, der Erhebung allgemeiner anamnestischer und medizinischer Daten und einem Screening der Sehleistungen. In den folgenden Terminen werden in randomisierter Abfolge die Leistungen der Farbwahrnehmung und der Bewegungswahrnehmung erhoben. Aufgrund der heterogenen Belastbarkeit hirngeschädigter Patienten ist jedoch davon auszugehen, dass entsprechend der individuellen Voraussetzungen längere Erholungspausen bzw. kürzere Untersuchungstermine erforderlich sein werden. Der Untersuchungsablauf richtet sich daher adaptiv an den gegebenen Belastbarkeitsgrenzen aus.

Werden im Studienverlauf spezifische Ausfälle der Farb- und Bewegungswahrnehmung belegt, wird der Patient nach seiner Bereitschaft gefragt, an möglichen Verlaufs- und Folgeuntersuchungen teilzunehmen. Diese werden gegebenenfalls nach Entlassung aus der Klinik in der Abteilung Allgemeine Psychologie, Fachbereich Psychologie, an der Justus-Liebig-Universität Giessen durchgeführt.

5. Datenregistrierung

Jeder Patient erhält nach seiner Zusage zur Studienteilnahme einen Versuchspersonen-Code, der sich aus Initialen und Geburtsdatum zusammensetzt. Die Zuordnung des Codes zu dem Namen und der Adresse

des Patienten wird in einem Ordner schriftlich abgelegt, der sich unter Verschluss befindet. Über die Zuordnung wird keine Computer-Datei erzeugt. Sämtliche Daten werden nur unter dem Versuchspersonen-Code geführt. Die Einverständniserklärungen, die die Namen der Patienten enthalten, werden ebenfalls unter Verschluss und getrennt von den erhobenen Daten aufbewahrt.

Die psychophysischen Daten werden mittels Computer registriert und gespeichert. Alle erzeugten Dateien mit den anonymisierten Daten befinden sich auf Rechnern, zu denen kein öffentlicher Zugang besteht. Die EDV-Anlagen sind mit einem Zugangscode gesperrt, der nur den Mitarbeitern bekannt ist.

Während der Perimetrie und einigen psychophysischen Messungen wird die Blickfixation videoüberwacht, es erfolgt jedoch keine Aufzeichnung. Es sind keine Tonaufnahmen vorgesehen.

Jeder Patient wird über die aufgezeichneten Daten und den Umgang mit diesen informiert.

6. Belastungen und Risiken

Die geplante Studie umfasst ausschließlich psychophysische Messungen. Es werden keine invasiven Verfahren eingesetzt und keine Medikamente verabreicht. Vor Studienbeginn erfolgt eine Aufklärung darüber, das die konzentrierte Anstrengung möglicherweise zu einer leichten Ermüdung führen kann. Die Patienten werden gebeten, subjektive Missempfindungen zu schildern. Der Untersuchungsablauf erlaubt jederzeit Unterbrechungen und Erholungspausen. Sollten die Patienten aufgrund kognitiver Einschränkungen von den an sie gestellten Aufgaben überfordert sein, wird die Studienteilnahme beendet werden, um die emotionale Belastung zu begrenzen. Organisatorisch ist die Studienteilnahme in den klinischen Tagesablauf eingebettet. Die Rehabilitationsbehandlung besitzt in jedem Fall Priorität, so dass den Teilnehmern keine Behandlungsnachteile entstehen. Zusammenfassend sind aufgrund der Studienteilnahme keine negativen Effekte für die Patienten zu erwarten.

Literatur

- Battelli, L., Cavanagh, P., & Thornton, I. M. (2003). Perception of biological motion in parietal patients. Neuropsychologia, 41, 1808-1816.
- Braun, D., Petersen, D., Schonle, P., & Fehle, M. (1998). Deficits and recovery of first- and second-order motion perception in patients with unilateral cortical lesions. European Journal of Neuroscience, 10, 2117-2128.
- Kerckhoff, G. (2000). Neurovisual rehabilitation: recent developments and future directions. Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry, 68, 691-706.
- Rorden, C. & Karnath, H.-O. (2004). Using human brain lesions to infer function: a relic from a past era in the fMRI age?. Nature Reviews Neuroscience, 5, 813-819.
- Ruttiger, L., Braun, D. I., Gegenfurtner, K. R., Petersen, D., Schonle, P., & Sharpe, L. T. (1999). Selective color constancy deficits after circumscribed unilateral brain lesions. Journal of Neuroscience, 19, 3094-3106.
- Schenk, T. & Zihl, J. (1997). Visual motion perception after brain damage: II. Deficits in form-from-motion perception. Neuropsychologia, 35, 1299-1310.
- Vaina, L. M., Cowey, A., Eskew, R. T., Jr., LeMay, M., & Kemper, T. (2001). Regional cerebral correlates of global motion perception: evidence from unilateral cerebral brain damage. Brain, 124, 310-321.
- Zihl, J. (2000). Visuoperzeptive und visuokognitive Störungen. In: W. Sturm, M. Hermann & C.-W. Wallesch (Hrsg.), Lehrbuch der Klinischen Neuropsychologie. Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Zihl, J. & von Cramon, Y. (1986). Zerebrale Sehstörungen. Stuttgart: Kohlhammer.

Anhang J:

Einschlusskriterien für die Patientenstudie

Wir suchen:

1. Patienten mit umschriebenen kortikalen Läsionen

- occipito-parietal oder occipito-temporal
- bi- oder unilateral
- Ätiologie: Infarkte, embolisch oder hämorrhagisch; abgrenzbare Tumore

2. Patienten mit hypoxischer Hirnschädigung

Zeitpunkt der Schädigung:

- Aufgrund der offenen Fragen zur Plastizität der visuellen Wahrnehmung sind für uns sowohl frische Schädigungen als auch länger zurückliegende Schädigungen von Interesse. Daher: **keine Einschränkungen**

Alter:

- 16 bis 80

Assoziierte Einschränkungen:

- Motorik - Patienten müssen vor dem Untersuchungs-Display sitzen können. Die Bedienung der Eingabetastatur wäre günstig, kann allerdings auch durch die Versuchsleiter erfolgen.
- Sprache - Instruktionsverständnis muss gegeben sein, Antworten können nonverbal gegeben werden
- Kognition - Das allgemeine Aufmerksamkeits- und Belastbarkeitsniveau muss eine Mitarbeit über zumindest 30 Minuten erlauben. Hemianopsie oder Neglect sind keine Ausschlusskriterien!

Generell gilt:

Im Zweifelsfall können wir in der ersten Untersuchungssitzung klären, ob eine weitere Teilnahme sinnvoll möglich ist !

Anhang K:

Aufklärungsbogen für die Patienten

JUSTUS-LIEBIG-
 UNIVERSITÄT
GIESSEN



Abteilung Allgemeine Psychologie

Otto-Behaghel-Str. 10F

35394 Giessen

<http://www.allpsych.uni-giessen.de>

Tel.: +49 (0)641/99-26101

Fax: +49 (0)641/99-26119

Prof. Dr. Karl R. Gegenfurtner

Prof. Dr. Frank Bremmer

Dr. Doris I. Braun

Dipl. Psych. Jutta Billino

Dipl. Psych. Lars Pracejus

Aufklärung

Vielen Dank für Ihr Interesse, an unserem laufenden Forschungsprojekt zur Bewegungswahrnehmung und zur Farbwahrnehmung teilzunehmen.

Die Teilnahme an den Experimenten ist freiwillig. Sie können jederzeit und ohne Angabe von Gründen aus den Untersuchungen ausscheiden, ohne dass Ihnen Nachteile daraus entstehen. Die Bestimmungen des Datenschutzes und des Arztgeheimnisses werden beachtet.

Mit Hilfe dieser Untersuchungen wollen wir die Funktionsweise des menschlichen Gehirns genauer untersuchen. Unser langfristiges Ziel ist es, eine bessere und schnellere Untersuchung von bisher nicht erfassbaren Störungen des Sehens zu entwickeln und damit die Therapie von Erkrankungen der Augen und des Gehirns zu verbessern.

Ein Risiko oder eine Gesundheitsbeeinträchtigung durch diese Experimente ist nicht bekannt und nicht vorstellbar. Es werden keine Medikamente verabreicht und keine Eingriffe vorgenommen. Vor der Untersuchung wurde Ihr Arzt um Zustimmung gebeten. Alle Untersuchungen wurden vorher an anderen Menschen, auch an uns selbst, überprüft.

Die einzelnen Untersuchungen können bis zu 1 Stunde dauern und können jederzeit unterbrochen werden. Durch die Konzentration auf die Aufgaben könnten Sie eventuell etwas ermüden. Teilen Sie es uns bitte mit, wenn Sie eine Erholungspause oder eine Unterbrechung wünschen.

Wir können Ihnen zum einen zusagen, dass unsere bisherigen Versuchspersonen die Experimente als unterhaltsam beurteilten und Sie mit Ihrer Teilnahme der Wissenschaft einen Dienst erweisen, auch wenn sich die Untersuchungsergebnisse noch nicht direkt in Ihre Behandlung einbinden lassen werden.

Bitte fühlen Sie sich frei, uns Ihre Beobachtungen und Verbesserungsvorschläge direkt mitzuteilen und zu fragen, was Sie möchten. Sie können uns auch nach Abschluss der Untersuchungsreihe über die Adresse im Briefkopf erreichen.

Anhang L:

Einverständniserklärung der Patienten

Einverständniserklärung

Ich habe die Aufklärung über die bevorstehende Studie zur Farb- und Bewegungswahrnehmung gelesen und verstanden. Mögliche Fragen wurden durch die Versuchsleiter umfassend beantwortet. Ich weiß, dass die Teilnahme freiwillig ist und jederzeit ohne Nachteile für mich abgebrochen werden kann. Ich wurde darüber aufgeklärt, dass die erhobenen Daten anonymisiert, d. h. ohne Namensnennung zu wissenschaftlichen Zwecken ausgewertet werden. Die Auswertung erfolgt ausschließlich an der Justus-Liebig-Universität Giessen und an der Philipps-Universität Marburg.

Ich bin zudem damit einverstanden, dass die Untersuchungsleiter Einblick in die bildgebenden Untersuchungsergebnisse und in meine Krankenakte nehmen dürfen. Die Bestimmungen des Datenschutzes und des Arztgeheimnisses werden dabei beachtet.

Die Untersuchungsleiter dürfen zu einem späteren Zeitpunkt mit mir erneut Kontakt unter meiner Privatadresse aufnehmen, um mich für mögliche Verlaufs- und Folgeuntersuchungen einzuladen. Ich kann jederzeit und ohne Angabe von Gründen ablehnen oder diese Erklärung widerrufen.

Hiermit erkläre ich mich bereit, an der Studie zur Farb- und Bewegungswahrnehmung teilzunehmen.

Braunfels, den _____

Unterschrift: _____

Name: _____

geboren am _____

Anhang M:

Statistische Angaben der Patientenstichprobe

Fall	Alter	Geschlecht	Familienstand	Kinder	Bildung	Händigkeit
vb040121	84	W	Verwitwet	7	HS	Rechts
mr260249	56	W	Verheiratet	2 (w/w)	HS	Rechts
cs110451	53	W	Verheiratet	3 w/w/w	MR	Rechts
hp210343	62	M	Verheiratet	2	Uni/FH	Rechts
dh020740	64	M	Verheiratet	2 (w/w)	MR	Rechts
gw080740	64	M	Verheiratet	3	MR	Rechts
jh110344	61	W	Verheiratet	1 (w)	MR	Rechts
jp301147	57	W	Verwitwet	2	MR	Rechts
ab261045	59	M	Verheiratet	1	Uni/FH	Rechts
eb061140	64	M	Verheiratet	2 (m/m)	MR	Rechts
bl010265	40	W	Ledig	-	Abitur	Rechts
kk070231	74	M	Verheiratet	2 (w/m)	HS	Rechts
pk201063	42	W	Ledig	-	MR	Rechts
ms300783	22	W	Ledig	-	Abitur	Rechts
ke300361	44	M	Verheiratet	4	HS	Rechts
sb040767	38	M	Verheiratet	2	Uni/FH	Rechts
ms300763	42	M	Verheiratet	-	MR	Links
el290942	63	M	Verheiratet	2 (w/m)	HS	Rechts
da280246	60	W	Verheiratet	2	MR	Rechts
uw130852	53	W	Verheiratet	2w, 2m	MR	Rechts
wh090546	60	M	Verheiratet	1 (m)	Uni/FH	Rechts
wr060753	52	M	Verheiratet	2	HS	Rechts
as020579	27	W	Ledig	0	MR	beide
hg260548	57	M	Verheiratet	2	HS	Rechts
fl040725	80	M	Verheiratet	2 (m/m)	HS	Rechts
gl250726	79	M	Verheiratet	2	Abitur	Rechts
ll310865	40	M	Verheiratet	1	MR	Rechts
kn200479	27	W	Geschieden	2	MR	Rechts

Anhang N:

Klinische Details der Patientenstichprobe

Fall	Sehschwäche	Diagnose	Hemi- parese	Aphasie	Läsion- Test Intervall (Monate)
vb040121	Hyperopie	Schlaganfall ACP re.	-	motor.	3
mr260249	Presbyopie	Schlaganfall ACM re.	-	motor.	1
cs110451	Presbyopie	Schlaganfall ACM li.	+	-	1.5
hp210343	Myopie	Schlaganfall ACP re.	+	-	1
dh020740	Myopie	Schlaganfall re.	+	-	4
gw080740	Myopie	Schlaganfall ACM re.	-	motor.	1
jh110344	Hyperopie	ICB li. par.	-	motor.	2
jp301147	Presbyopie	SAB, Aneurysma ACM re.	+	-	1.5
ab261045	Hyperopie	ICB re. occ.	-	-	7.5
eb061140	Hyperopie	Schlaganfall ACM re., Aneurysma	+	-	1
bl010265	-	Oligoastrozytom re. fro.	-	-	84
kk070231	Hyperopie	Schlaganfall ACM & ACP re., PICA	+	-	10
pk201063	-	SAB aus ACM Aneurysma	-	-	1
ms300783	-	SAB, ACM li,	-	-	2
ke300361	-	ICB	+	-	3
sb040767	-	ICB re. par.	-	-	2
ms300763	Myopie	Blutung li.	+	mot./sens	4
el290942	Hyperopie	Schlaganfall ACP re.	-	-	1
da280246	Hyperopie	Meningeom li.	+	-	1.5
uw130852	Presbyopie	SAB re., Aneurysma	+	-	24
wh090546	Hyperopie	Schlaganfall ACM li.	+	motor.	1
wr060753	Presbyopie	Schlaganfall re. par.	+	-	1
as020579	Hyperopie	ACM li.	+	motor.	6
hg260548	Hyperopie, li. amblyop	Tumor li. occ.	-	-	12
fl040725	Hyperopie	ACM re. & ACP li.	+	-	1.5
gl250726	Presbyopie	SAB (chronisch) re.	-	-	1
ll310865	-	ACM li.	+	-	1.5
kn200479	Hyperopie	SAB nach Aneurysmablutung	-	-	2

Anhang O:

Ergebnisse der Voruntersuchung der Patientenstichprobe

k = korrigiert, M = Mesulam, LH = Linienhalbieren,

Kontrastsehen in Logarithmischer Kontrastsensitivität (Log CS),

Stereosehen in Bogensekunden (BS)

Fall	Peri- metrie	Nah Visus	Neglect (M)	Neglect (LH)	Farben- sehen	Kontrast- sehen	Stereo- sehen
vb040121	◐	0.8 (k)	3 / 0	k.A.	12/ 15	k.A.	40
mr260249	○	0.8 (k)	3 / 1	k.A.	14/ 15	1.80	50
cs110451	○	1.0	1 / 0	k.A.	15/ 15	1.95	50
hp210343	○	1.4	0 / 0	k.A.	14/ 15	1.95	40
dh020740	○	1.4	2 / 0	k.A.	11/ 15	1.80	200
gw080740	○	0.9	0 / 0	k.A.	14/ 15	1.65	40
jh110344	○	1.0 (k)	1 / 2	k.A.	15 / 15	1.65	100
jp301147	○	0.9 (k)	1 / 0	k.A.	14 / 15	1.95	100
ab261045	○	0.9	0 / 0	-	15 / 15	1.95	40
eb061140	○	1.0	0 / 0	-	15 / 15	1.80	200
bl010265	○	0.8	1 / 0	-	13 / 15	1.95	100
kk070231	○	0.8 (k)	2 / 1	-	15 / 15	1.65	> 800
pk201063	○	1.0	0 / 0	-	15 / 15	1.95	40
ms300783	○	1.0	0 / 0	-	13 / 15	1.80	40
ke300361	○	1.0	0 / 0	-	15 / 15	1.95	80
sb040767	○	0.9	0 / 1	-	11 / 15	1.95	40
ms300763	◑	1.25	0 / 0	-	14 / 15	1.65	200
el290942	◐	0.9	0 / 0	-	7 / 15	1.95	40
da280246	◑	1.0	0 / 1	-	14 / 15	1.95	40
uw130852	○	1.0 (k)	0 / 1	-	13 / 15	1.95	100
wh090546	○	0.9 (k)	0 / 0	-	15 / 15	1.95	40
wr060753	○	1.25	0 / 0	-	15 / 15	1.80	140
as020579	◑	1.25	0 / 0	-	15 / 15	1.95	60
hg260548	○	1.0	1 / 0	-	15 / 15	1.95	kein Stereo
fl040725	○	0.8	1 / 0	-	15 / 15	1.65	40
gl250726	○	0.8	0 / 2	-	11 / 15	1.65	100
ll310865	○	1.0	0 / 1	-	15 / 15	1.95	40
kn200479	○	1.0	0 / 0	-	14 / 15	1.95	40

Erklärung

Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.

Giessen, im Dezember 2006

Lars Pracejus