

Aus der
Klinik und Poliklinik für Augenheilkunde
der Medizinischen Fakultät
der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

**Untersuchung des Farbsehens
mittels Pigmentfarbtafeln und Tablet-PC**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. med.

(doctor medicinae)

an der Medizinischen Fakultät
der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

vorgelegt von Panagiota Tsimpri

aus Berlin

Magdeburg 2015

Bibliographische Beschreibung

Tsimpri, Panagiota:

Untersuchung des Farbsehens mittels Pigmentfarbtafeln und Tablet-PC

2015, 75 Seiten, 39 Abbildungen, 14 Tabellen

Kurzreferat:

Im Rahmen einer prospektiven, randomisierten Studie wurde die Testung des Farbsehens bei angeborenen Farbsehstörungen bei Verwendung eines Buches (19 Pigmentfarbtafeln nach Velhagen/Broschman/Kuchenbecker) und eines Tablet-PCs (iPad2®) verglichen.

Die Untersuchung wurde unter standardisierten Untersuchungsbedingungen durchgeführt.

Es wurden in einem Zeitraum von Mai 2012 bis Dezember 2013 randomisiert 77 Probanden mit einem Durchschnittsalter von $42,81 \pm 16,9$ und einem Durchschnittsvisus von $0,99 \pm 0,1$ untersucht. 62 Probanden waren Farbnormale und 15 Probanden hatten eine angeborene Farbsehstörung. Die Übereinstimmung der Ergebnisse aller Probanden von Buch und Tablet-PC betrug 88,0%. Bei den Probanden mit Farbsehstörungen bestand eine Übereinstimmung von 83,3%, bei den Probanden ohne Farbsehstörungen bestand eine Übereinstimmung von 89,1%. Zwischen Buch und iPad1® bestand eine Übereinstimmung von 84,4% und zwischen iPad1® und iPad2® eine Übereinstimmung von 87,2%.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass bei der Untersuchung des Farbsehens in etwa vergleichbare Ergebnisse mittels Buch und Tablet-PC erzielt wurden, wobei die Trennschärfe des Buches besser war und die technische Limitationen des Tablet-PCs zu berücksichtigen sind.

Schlüsselwörter:

Farbsehen – Farbtafeln – Tablet-PC – iPad2® – angeborene Farbsehstörungen

Meinen Eltern und meinem Mann in Dankbarkeit gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

Bibliographische Beschreibung	II
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Nutzungsmöglichkeiten von Tablets-PC und Applikationen in der Medizin	1
1.2 Der Einsatz von Smartphones und Tablet-PC in der Augenheilkunde.....	2
1.3 Ziel dieser Arbeit.....	5
2 Grundlagen	6
2.1 Anatomie	6
2.2 Physiologie	10
2.3 Angeborene und erworbene Farbsehstörungen	14
2.3.1 Angeborene Farbsehstörungen	14
2.3.2 Erworbene Farbsehstörungen	16
2.4 Grundlagen des Farbsehens	18
2.5 Definition der Farbe	19
2.6 Farbsysteme.....	20
2.6.1 CIE-Normfarbdreieck.....	20
2.6.2 Munsell-Farbraum	24
2.6.3 RGB-Farbmodell.....	26
2.6.4 CMY/CMYK-Farbmodell	27
2.7 Untersuchungsmethoden bei Farbsehstörungen.....	28
2.7.1 Pseudoisochromatische Tafeln.....	28
2.7.2 Farbordnungstests.....	32
2.7.3 Anomaloskope.....	34
2.8 Tablet-PC	36

2.8.1	Funktionsweise von Tablet-PCs	36
2.8.2	Farbdisplay von Tablet-PCs – Aufbau und Funktionsweise	39
3	Methodik	44
3.1	Probandenrekrutierung	44
3.2	Verwendete Farbtafeln und verwendetes Anomaloskop	44
3.3	Durchführung der Tests	46
3.4	Statistische Auswertung	48
4	Ergebnisse der statistischen Auswertung	50
4.1	Alters- und Geschlechtsverteilung	50
4.2	Visusergebnisse	50
4.3	Verteilung der Farbsehstörungen	51
4.4	Verteilung der Fehler	51
4.5	Vergleich des Farbsehens anhand verschiedener Medien	53
4.5.1	Vergleich des Farbsehens mittels Buch und iPad2® bei allen Probanden	53
4.5.2	Vergleich des Farbsehens mittels Buch und iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörung	55
4.5.3	Vergleich des Farbsehens zwischen Buch und iPad2® bei den Probanden ohne Farbsehstörung	57
4.5.4	Vergleich des Farbsehens mittels iPad1® und iPad2® bei allen Probanden	59
4.5.5	Vergleich bei der Untersuchung des Farbsehens zwischen Buch und iPad1® bei allen Probanden	61
4.5.6	Vergleich bei der Untersuchung des Farbsehens zwischen den drei Gruppen (Buch vs. iPad1®, Buch vs. iPad2®, iPad1® vs. iPad2®)	63
5	Diskussion	65
5.1	Probanden	65
5.2	Bewertung der Tafeln	65
5.3	Technische Limitationen	71
6	Zusammenfassung	74

Literaturverzeichnis	XIII
Danksagung	XXIV
Ehrenerklärung	XXV
Lebenslauf	XXVI
Anhang 1	XXVIII
Anhang 2	XXXVIII
Anhang 3	XLV

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Stäbchen und Zapfen	6
Abb. 2: Spektrale Absorptionskurven der menschlichen Rot-, Grün- und Blauzapfen.....	7
Abb. 3: Die Verteilung der Photorezeptoren in der Retina	8
Abb. 4: Simulation des Zapfenmosaiks der Fovea	8
Abb. 5: Netzhautschichten	9
Abb. 6: Vergleich der Molekülstrukturen des Opsins	10
Abb. 7: Stimulation der ON- und OFF-Kanäle.....	11
Abb. 8: Synapsen zwischen Bipolar- und Ganglienzellen	12
Abb. 9: Schematische Darstellung der Projektion der Ganglienzellen am Corpus geniculatum im Colliculus superior	13
Abb. 10: Unterschiedliche Farbtöne von Blau	19
Abb. 11: Unterschiedliche Sättigung	20
Abb. 12: Unterschiedliche Helligkeit.....	20
Abb. 13: CIE-Normfarbdreieck.....	22
Abb. 14: Farbverwechslungsgeraden des Protanopen (a), Deuteranopen (b) und Tritanopen (c)	23
Abb. 15: Munsell-Farbsystem	24
Abb. 16: Munsell-Farbsystem	25
Abb. 17: RGB-Farbsystem.....	26
Abb. 18: CMY-Farbmodell	27
Abb. 19: Beispiel einer Transformationstafel	29
Abb. 20: Beispiel einer Tafel mit verschwindenden Zeichen	29
Abb. 21: Beispiel einer Tafel mit versteckten Zeichen	30
Abb. 22: Beispiel einer diagnostischen Farbtafel	30
Abb. 23: Panel D-15-Test	33
Abb. 24: Der Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test	33
Abb. 25: Kreisförmiges Prüffeld des HMC-Anomaloskops.....	34
Abb. 26: Nagelanomaloskop.....	35

Abb. 27: Darstellung eines iPads®	38
Abb. 28: Projiziert-kapazitiver Touchscreen.....	42
Abb. 29: iPad®-Farbraum vs. sRGB-Farbraum (Grid)	43
Abb. 30: Farbraumdarstellung von verschiedenen Tablet-PCs.....	43
Abb. 31: Tafeln zur Prüfung des Farbsehens	44
Abb. 32: Verwendetes HMC-Anomaloskop.....	46
Abb. 33: Untersuchungsplatz	47
Abb. 34: Verwendetes iPad2® mit Darstellung einer Farbtafel	47
Abb. 35: Ishihara-Farbtafel 17.....	48
Abb. 36: Darstellung der Altersverteilung der Probanden mit und ohne Farbsehstörung	50
Abb. 37: Darstellung der Visusverteilung der Probanden mit und ohne Farbsehstörung	51
Abb. 38: Darstellung der Anzahl der Fehler pro Tafel bei der Untersuchung des Farbsehens mittels Buch bei den Probanden mit Farbsehstörung (rot) und ohne Farbsehstörung (blau)	52
Abb. 39: Darstellung der Anzahl der Fehler pro Tafel bei der Untersuchung des Farbsehens mittels iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörung (rot) und ohne Farbsehstörung (blau)	52

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Häufigkeit angeborener Farbsehstörungen.....	15
Tab. 2: Darstellung der Punktdichten (in Pixel pro Zoll) und Bildschirmauflösungen von verschiedenen iPad®-Generationen	40
Tab. 3: Verwendete Farbtafeln.....	45
Tab. 4: Vergleich des Farbsehens zwischen Buch und iPad2® bei allen Probanden.....	53
Tab. 5: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel zwischen Buch und iPad2® bei allen Nutzern	54
Tab. 6: Vergleich des Farbsehens mittels Buch und iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörung.....	55
Tab. 7: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel mittels Buch und iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörungen	56
Tab. 8: Vergleich der Untersuchung des Farbsehens zwischen Buch und iPad2® bei den Probanden ohne Farbsehstörungen	57
Tab. 9: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel mittels Buch und iPad2® bei den Probanden ohne Farbsehstörungen	58
Tab. 10: Vergleich der Untersuchung des Farbsehens mittels iPad1® und iPad2® bei allen Probanden.....	59
Tab. 11: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel mittels iPad1® und iPad2® bei allen Nutzern	60
Tab. 12: Vergleich des Farbsehens zwischen Buch und iPad1® bei allen 10 Probanden, die mittels iPad1® untersucht wurden.....	61
Tab. 13: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel mittels Buch und iPad1® bei allen Nutzern, die mittels iPad1® untersucht wurden.....	62
Tab. 14: Übereinstimmung nach Landis und Koch zwischen den drei Gruppen (Buch vs. iPad2®, Buch vs. iPad1®, iPad1® vs. iPad2®)	64

Abkürzungsverzeichnis

AAC	Advanced Audio Coding
AAX	Avid Audio Extension
AIFF	Audio Interchange File Format
Abb.	Abbildung
App	Applikation
AV	audiovisuell
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CD	Compact Disc
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CMY/CMYK	Cyan Magenta Yellow/Cyan Magenta Yellow Key
CMS	color management-system
doc	document
dt.	deutsch
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EDR	Enhanced Data Rate
etc.	et cetera
Fa	Firma
FDA	Food and Drug Administration
GB	Gigabyte
ggf.	gegebenenfalls
GHz	Gigahertz
gif	Graphics Interchange Format
GSM	Global System for Mobile Communications
HD	High Definition
HDRI	High Dynamic Range Image
HE-ACC	High-Efficiency Advanced Audio Coding

HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access
html	Hypertext Markup Language
Hz	Hertz
IPS	In-plane Switching
Jpg/JPEG	Joint Photographic Experts Group
LC	Low Complexity
LCD	Liquid-crystal Display
LED	Light-emitting Diode
MB	Megabyte
MHz	Megahertz
MPEG	Moving Picture Experts Group
nm	nanometer
Nr.	Nummer
OPN1LW	Opsin 1 Long Wave
OPN1MW	Opsin 1 Middle Wave
PC	Personal Computer
PCM	Puls-Code-Modulation
PCT/PCAP	Projected Capacitive Touch
PDA	Persönlicher digitaler Assistent
Pdf	Portable Document Format
ppi	Pixels per Inch
ppt	Power-Point-Presentation
PVC	Polyvinylchlorid
RAW	Raw image Format
RGB	Rot-Grün-Blau
RPE	retinales Pigmentepithel
rtf	Rich Text Format
SAW	Surface Acoustic Wave

Sek.	Sekunde
SIM	Subscriber Identity Module
SOC	System-on-a-chip
SPP	Standard Pseudoisochromatic Plates
Tab.	Tabelle
tiff	Tagged Image File Format
TV	Television
txt	text
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
usw.	und so weiter
VBR	Variable Bitrate
vcf	Variant Call Format
VGA	Video Graphics Array
vs.	versus
WAN	Wide Area Network
WLAN/Wi-fi	Wireless Local Area Network
xls	Excel File Format
z. A.	zum Ausschluss
z. B.	zum Beispiel

1 Einleitung

1.1 Nutzungsmöglichkeiten von Tablets-PC und Applikationen in der Medizin

Mit der Entwicklung von Smartphones und Tablet-PC entstanden rasch auch viele medizinische Applikationen.

Es gibt heute kaum ein gesundheitliches oder medizinisches Problem, für das es keine Applikation gibt. In den letzten Jahren sind über 1500 Applikationen für den Gesundheitsbereich entwickelt worden. Die medizinischen Applikationen spielen derzeit in dem medizinischen Bereich nur eine untergeordnete Rolle, sie werden aber in den kommenden Jahren allmählich an Bedeutung zunehmen.

Es gibt bspw. die sogenannten „stand-alone-Apps“. Damit kann der Patient selbst seine Erkrankung dokumentieren und kontrollieren. Mit der Applikation „SkinTracer“ kann der Patient z. B. verdächtige Hautläsionen dokumentieren und zur Begutachtung an Hautärzte senden.

Diabetiker können ein iPhone-Gadget benutzen, bei dem die Blutstreifen gelesen und dokumentiert werden können, wodurch die Dosierung der Insulinmenge justiert werden kann.

Zahlreiche Navigations-Apps sind von großem Nutzen im Alltag wie auch in Notfallsituationen. Sogar ein EKG kann heute mit dem Smartphone aufgenommen werden, das dann im Fall eines Herzinfarkts ein Signal absendet.

Die zunehmende Bedeutung der medizinischen Applikationen ist unbestritten. Bereits verfügbare bzw. modifizierte Applikationen werden vermutlich in der Zukunft als unabdingbare Hilfsmittel zur Unterstützung und Erleichterung im Gesundheitswesen beitragen (Stanzel et al., 2012).

1.2 Der Einsatz von Smartphones und Tablet-PC in der Augenheilkunde

Mit zunehmender Verbreitung von Smartphones und Tablet-PCs haben die Applikationen in der Augenheilkunde als Hilfsmittel zur Diagnose, Therapie und Bildung das Potenzial, eine Erleichterung in der klinischen Versorgung der Patienten, der Datenverarbeitung und der Kommunikation zu erzielen (Stanzel et al., 2012).

Die über 70 verfügbaren ophthalmologischen Applikationen können in verschiedene Kategorien unterteilt werden: klinische Untersuchungsfunktionen, Fotografie und Videoaufnahmen, Organisationsfunktionen, Erklärungs- und Aufklärungsfunktionen, medizinische Informationen.

Es gibt verschiedene ophthalmologische Applikationen für die Testung des Visus, des Astigmatismus, der Pupillengröße, zudem gibt es Amsler-Grid-Tests und ein Risikobewertungssystem für die Makuladegeneration (Chiu et al., 2014). Auch die Testung von anderen Sehfunktionen, wie z. B. die Farbsehtestung, ist mit Applikationen heute möglich. Zudem stehen auch Applikationen zur Farberkennung als Hilfsmittel bei Rot-Grün-Störung zur Verfügung. Weiterhin können Applikationen für die Berechnung des Glaukomrisikos, für das Glaukommonitoring und elektronische Patientenakten angewendet werden, zudem können Übersetzungs-Applikationen und Navigations-Applikationen für Sehbehinderte von Nutzen sein (Aslam et al., 2013; Lee et al., 2014; Ruamviboonsuk et al., 2012; Zhang et al., 2013). „The Eye Handbook“ ist z.B. eine sehr bekannte und weitverbreitete ophthalmologische Applikation mit vielen Nutzungsmöglichkeiten, von der Visusprüfung bis zur Kalkulation der IOL-Stärke (Lord et al., 2013). Eine Applikation zur Berechnung von Gesichtsfelddefekten erwies sich als präziser und schneller als die Interpretation durch oculoplastische Chirurgen. Die Beurteilung durch die Chirurgen war ungenau, sehr variabel und oft unterbewertet im Vergleich zu der Berechnung durch die Applikation. Der mittlere Prozentsatz der Fehler betrug 1,98% bei der Applikation und 9,75% bei den Chirurgen (R. N. Maamari et al., 2014).

Die spektrometrische Funktion von Smartphones bzw. Tablet-Pcs kann preiswert für die Farbmeterik genutzt werden (Hong et al., 2014).

Es gibt auch verschiedene Methoden zur digitalen Fotodokumentation des anterioren und posterioren Abschnitts des Auges mittels Smartphone oder Tablet-PC. So gibt es die Möglichkeit der digitalen Fotodokumentation an der Spaltlampe mit einem modifizierten binokularen Strahlenteiler. Der erste Strahl ist mit einer digitalen Kamera und der zweite Strahl mit der Lichtquelle eines synchronisierten Blitzlichts verbunden. Dann gibt es die Möglichkeit der Fundusaufnahme mittels eines Monokulars am Mikroskop. Damit ist eine bis zu sechzigfache Vergrößerung möglich. Die dritte Variante ist ein USB-Mikroskop. Damit können Bilder mit hoher Auflösung aufgenommen und dann digital gespeichert werden. Eine ausgezeichnete Fotodokumentation ist für einen geübten Benutzer mit allen drei Methoden gut möglich. Die zunehmende Verbreitung von Smartphones und Tablet-PCs und die signifikante Verbesserung der digitalen Kameras machen ihren Einsatz in der Medizin ohne Zweifel sinnvoll (Tietjen et al., 2013). Mittels Smartphone und Tablet-PC können bspw. Vorderabschnitt- und Fundusfotos dokumentiert und weitergeleitet werden sowie eine Fluoreszenzangiographie durchgeführt werden. Außerdem kann ein Smartphone oder Tablet-PC als Datenbank genutzt werden (Barsam et al., 2010; Gurram, 2013; Haddock et al., 2013; Lamirel et al., 2012; Shanmugam et al., 2014; Suto, 2014a, 2014b). Eine Ophthalmoskopie mittels Smartphone zeigte ähnliche Ergebnisse mit der Spaltlampen-Biomikroskopie in Mydriasis bei der Untersuchung und Klassifikation der diabetischen Retinopathie. Die Tragbarkeit, die Erschwinglichkeit und die Netzwerkfähigkeit einer Ophthalmoskopie mittels eines Smartphone-Ophthalmoskops macht dies zu einer vielversprechenden Methode für Screening-Tests (Kumar et al., 2012; Russo et al., 2015). Außerdem können Fundusaufnahmen mittels einer smartphone-basierten retinalen Kamera bei der Diagnose, beim Monitoring und bei der Therapie von retinalen Erkrankungen bei Patienten mit eingeschränkter Mobilität durch die Möglichkeit der Fernauswertung (Telemedizin) sehr sinnvoll eingesetzt werden (R. N. Maamari et al., 2014). Smartphones wurden bereits zur Auswertung von

Computertomographie-Bildern bei orbitaler Myocysticercose bei ambulanten Patienten verwendet (Meena et al., 2013).

Smartphones, Tablet-PCs und E-Books sind wichtige Hilfsmittel für Patienten mit reduzierter Sehschärfe. Patienten mit stark reduziertem Visus oder mit Erblindung können von Applikationen bzw. E-Books mit Spracheingabe- bzw. Sprachausgabe-Möglichkeiten profitieren. Objekte können aber auch mit der digitalen Kamera aufgenommen und mit der elektronischen Lupe vergrößert werden, was für Patienten mit relativ reduzierter Sehschärfe von großem Nutzen ist. Außerdem können mit dem Kamera-Lichtblitz Objekte besser beleuchtet werden (Crossland et al., 2014). Die Applikation „Display Reader“ zum Aufspüren von Haushalts- bzw. elektronischen Geräten für Patienten mit reduzierter Sehschärfe ist bereits in Entwicklung (Fusco et al., 2014). Auch ein spezielles sehkraft-basiertes computerassistiertes Smartphone-System zur Führung von Sehbehinderten an den Straßenkreuzungen ist bereits entwickelt worden. Das System ermöglicht die Selbstlokalisierung sowie die Einschätzung der relativen Lokalisation, bezogen auf die Fußgängerübergänge an den Straßenkreuzungen. Damit können sich Sehbehinderte auf den sicheren Fußgängerübergang ausrichten (Murali et al., 2013).

Auch gibt es kosteneffektive Applikationen, die mittels SMS die Patienten an Arzttermine rechtzeitig erinnern (Koshy et al., 2008).

Zusammenfassend werden Smartphones und Tablet-PCs zunehmend unverzichtbare Gegenstände im Alltag des Gesundheitswesens. Mit ophthalmologischen Applikationen können Smartphones auch zu anspruchsvollen Medizinprodukten werden. Smartphones können nützliche Instrumente für eine evidenzbasierte Medizin, für die Berufsausbildung, die klinische Mobilkommunikation, die Ausbildung und Aufklärung der Patienten, das Selbstmanagement von Erkrankungen, für das ferngesteuerte Monitoring von Patienten sein oder auch als administratives Mittel dienen (Chiu et al., 2014). Die innovative Rolle der medizinischen Applikationen für die Forschung, Ausbildung und Datenübertragung zeigt, dass Smartphones und Tablet-PCs in der Zukunft

eine große Rolle in der Augenheilkunde und der Medizin allgemein spielen können (Chhablani et al., 2012; Zvornicanin et al., 2014).

Die Nutzung von Smartphones und Tablet-PCs als medizinische Produkte erfolgt derzeit aber nicht standardisiert, und die Verwendung im klinischen Alltag sollte vorsichtig überlegt werden (Zvornicanin et al., 2014). In einer Studie zu 182 ophthalmologischen Applikationen waren nur 37% professionell konzipiert worden. Davon waren jeweils nur 52% der Applikationen von Ophthalmologen und 44% von Optikern entworfen worden. 31% der untersuchten Applikationen waren nicht von Ophthalmologen und 21% überhaupt nicht von Experten erstellt worden (Cheng et al., 2014).

Für die Farbsehtestung sind bereits zahlreiche Computerprogramme und webbasierte Anwendungen entwickelt worden (Arden et al., 1988; Awad et al., 2007; Cavanagh et al., 1986; Edsel et al., 1994; Heard et al., 1987; Hoffmann et al., 1998; Ing et al., 1994; Kuchenbecker et al., 2007; Mollon et al., 1989; Reffin et al., 1991; Röhl et al., 2007). Auch finden sich in einigen Applikationen für Smartphones bzw. Tablet-PCs zur Farbsehtestung Farbtafeln, wie z. B. „The Eye Handbook“ oder „Eye2Phone“, die jedoch bisher nicht in Studien auf ihre Tauglichkeit untersucht worden sind.

1.3 Ziel dieser Arbeit

Es gibt derzeit noch keine Applikationen bzw. E-Books für die Testung des Farbsehens, die durch Studien evaluiert sind. Ziel unserer Studie ist der Vergleich der Untersuchungsergebnisse zwischen Tablet-PC und Buch (34. Auflage der Broschmann/Velhagen/Kuchenbecker-Farbtafeln), um eine Aussage treffen zu können, inwieweit sich ein Tablet-PC (iPad®) für eine Prüfung bzw. das Screening des Farbsehens eignet.

2 Grundlagen

2.1 Anatomie

Im menschlichen Auge existieren zwei Grundtypen von Photorezeptoren: die Stäbchen und die Zapfen (Abb. 1).

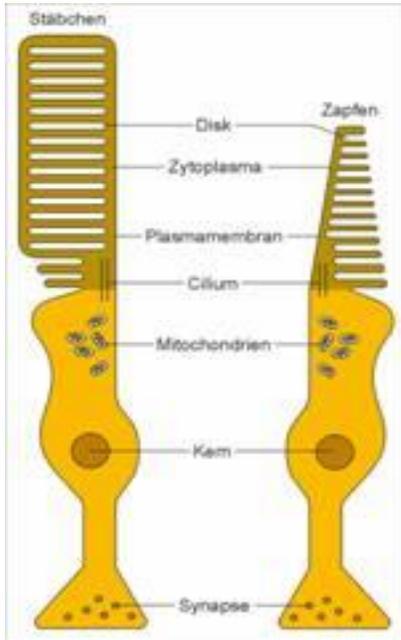


Abb. 1: Stäbchen und Zapfen (Frings et al., 1998)

Die 110-125 Millionen Stäbchen enthalten das Photopigment Rhodopsin und sind für das blaue-grüne Licht empfindlich. Die Stäbchen ermöglichen das Dämmerungs- (mesopisches Sehen) und das Nachtsehen (skoptopisches Sehen). Die 6-7 Millionen Zapfen enthalten verschiedene Typen des Farbpigments Opsin. Sie sind für das Tagessehen (photopisches Sehen) sowie für das Auflösungsvermögen und das Farbsehen zuständig. Abhängig von der Struktur des Opsin-Moleküls kann man drei Zapfentypen unterscheiden: Blau-, Grün- und Rotzapfen. Die Blauzapfen enthalten ein kurzwelliges Farbpigment (Cyanlab), welches den spektralen Bereich mit dem Empfindlichkeitsmaxima 415-425 nm erfasst, die Grünzapfen sind mittelwellig (Chlorolab) und erfassen den spektralen Bereich mit dem Empfindlichkeitsmaxima 520-540 nm, und die Rotzapfen (Erythrolab) sind langwellig und erfassen den spektralen Bereich mit

dem Empfindlichkeitsmaximum 550-570 nm (Boynton, 1988; Conway, 2009; De Valois et al., 1966; Gegenfurtner et al., 2003; Jacobs, 1976; Lanthony, 1987; Lennie et al., 1988; Michael, 1973; Nathans, 1989, 1999; Nathans et al., 1989; Nathans, Merbs, et al., 1992; Nathans, Piantanida, et al., 1986; Ripps et al., 1969; Swanson et al., 2003; Walraven, 1972) (Abb. 2) .

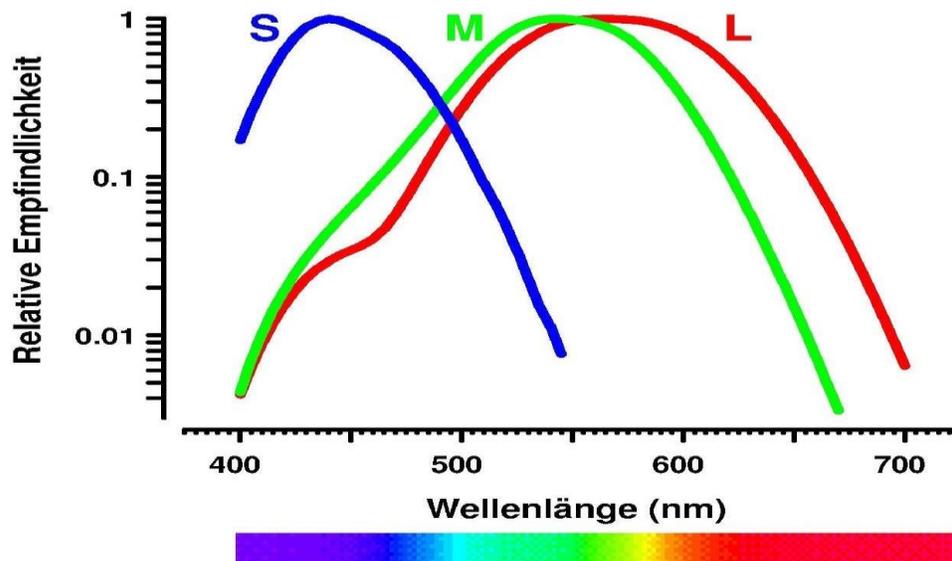


Abb. 2: Spektrale Absorptionskurven der menschlichen Rot-, Grün- und Blauzapfen (Gegenfurtner et al., 2003)

Die Zapfen sind auf der Netzhaut zu einem unregelmäßigen Mosaik angeordnet. Die Zapfen haben die höchste Dichte im Zentrum der Fovea centralis, und zur Peripherie hin nimmt die Dichte rasch ab. Bei einer Exzentrizität von 6° steigt die Anzahl der Blauzapfen um bis zu 250% an, während der Anteil der Rot- und Grünzapfen um 30% fällt (Marré et al., 1986). Blauzapfen gibt es nur in der peripheren Retina, aber auch dort treten sie mit einer geringeren Dichte auf. Die höchste Dichte der Stäbchen findet sich in ca. 20° Abstand von der Fovea. Grundsätzlich ist die Stäbchendichte in der Peripherie viel höher. Am blinden Fleck (ca. 15°) gibt es keine Rezeptoren (Abb. 3).

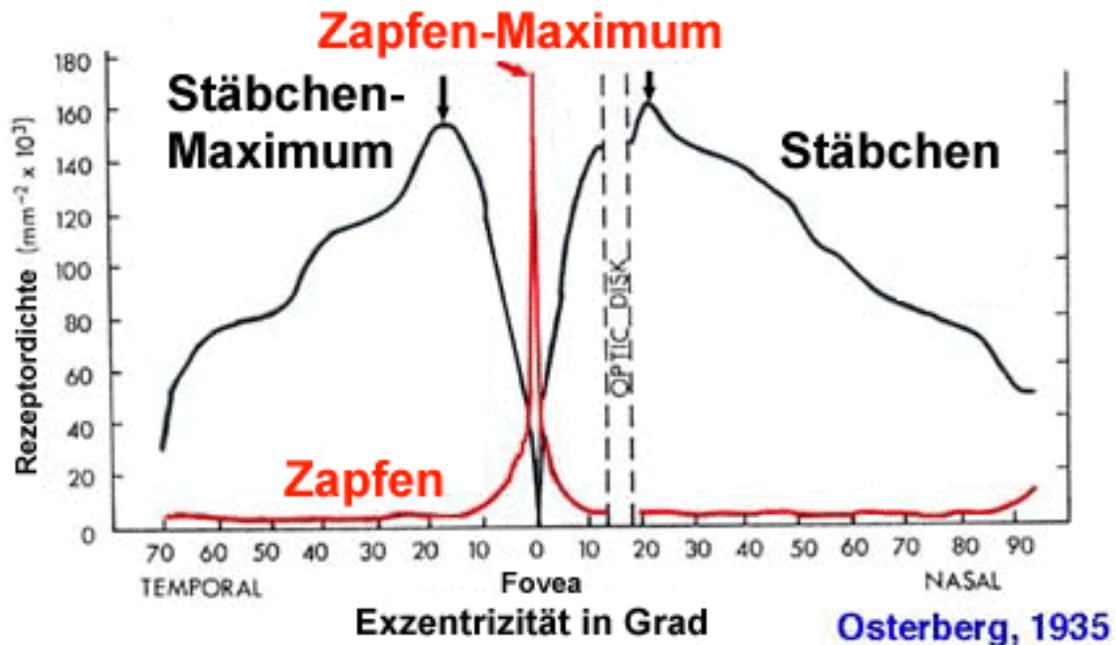


Abb. 3: Die Verteilung der Photorezeptoren in der Retina (Kolb, 1995e; Osterberg, 1935)

Die Rot-zu-Grün-Zapfen-Ratio kann variieren (Carroll et al., 2002; Yamaguchi et al., 1997). Die Rotzapfen kommen in der Regel häufiger vor. Es gibt etwa elf langwellig empfindliche Zapfen, neun mittelwellig und nur einen kurzwellig empfindlichen Zapfen (Dartnall et al., 1983). Das Photorezeptormosaik der menschlichen Netzhaut wurde 1999 direkt abgebildet (Roorda et al., 1999) (Abb. 4).

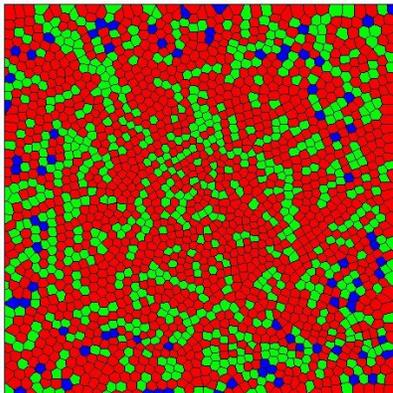


Abb. 4: Simulation des Zapfenmosaiks der Fovea. Die Positionen der Zapfen entstammen anatomischen Messungen. Die Einfärbung wurde nach einem Zufallsschema durchgeführt unter der Annahme, dass Rotzapfen ca. doppelt so häufig sind wie Grünzapfen (Gegenfurtner et al., 2010).

Die Photorezeptorenaußensegmente liegen am retinalen Pigmentepithel und sind mit einer kleinen Übergangszone mit dem Photorezeptorinnensegment verbunden. Die Innensegmente sind mit den Müller-Zellen verbunden (Abb. 5).

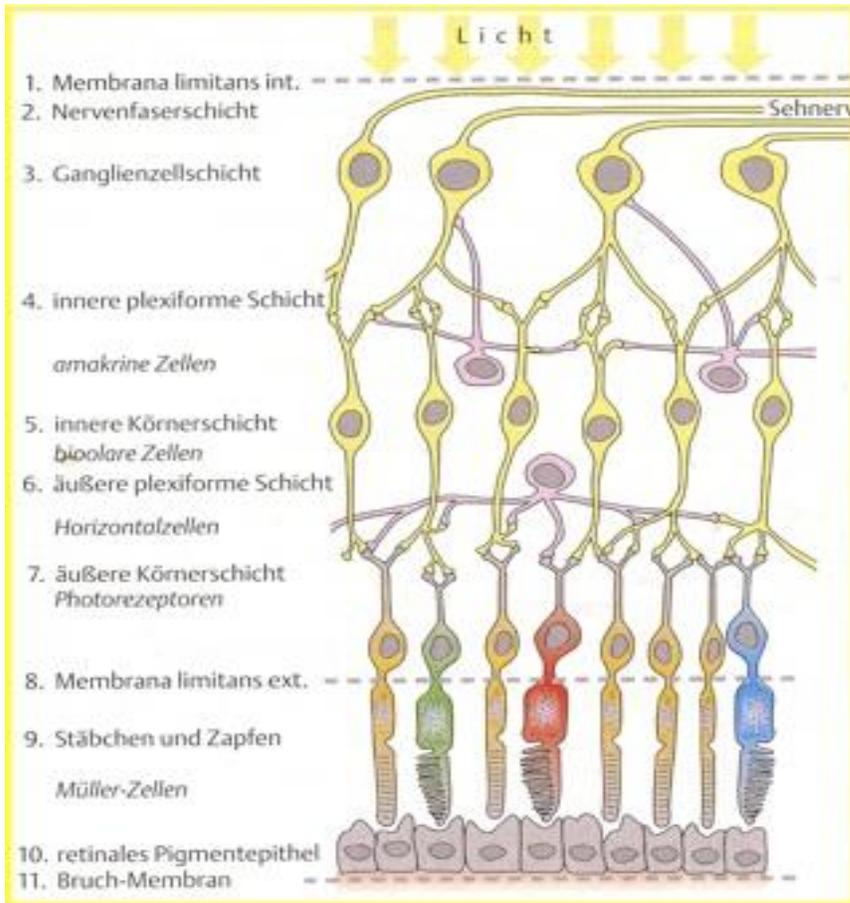


Abb. 5: Netzhautschichten (Lang, 2000)

Der Interphotorezeptormatrix füllt den Interzellulärraum zwischen den Photorezeptorenaußensegmenten und gewährleistet teilweise die Adhäsion zwischen Netzhaut und RPE. In den Mikrovilli der RPE-Zellen findet die Phagozytose der äußeren Anteile der Außensegmente statt. In den Innensegmenten befinden sich der Zellkern und die Dendriten, welche mit den Bipolar- und den Horizontalzellen Synapsen bilden. Die Außensegmente werden ständig regeneriert (Kolb, 1995e, 1995h).

2.2 Physiologie

Intraretinale Signalverarbeitung

Wenn ein Farbreiz die Netzhaut trifft, wird dieser zunächst von den Photorezeptoren absorbiert. Die Opsine (Rhodopsin, Blau-, Grün- und Rot-Opsin) der Photorezeptoren sind in die Membranscheiben der Außensegmente eingebunden. Die Aminosäuresequenz jedes Opsin-Moleküls ist für dessen spezifische spektrale Absorptionseigenschaften verantwortlich (Nathans, 1999; Nathans, Piantanida, et al., 1986; Nathans, Thomas, et al., 1986) (Abb. 6).

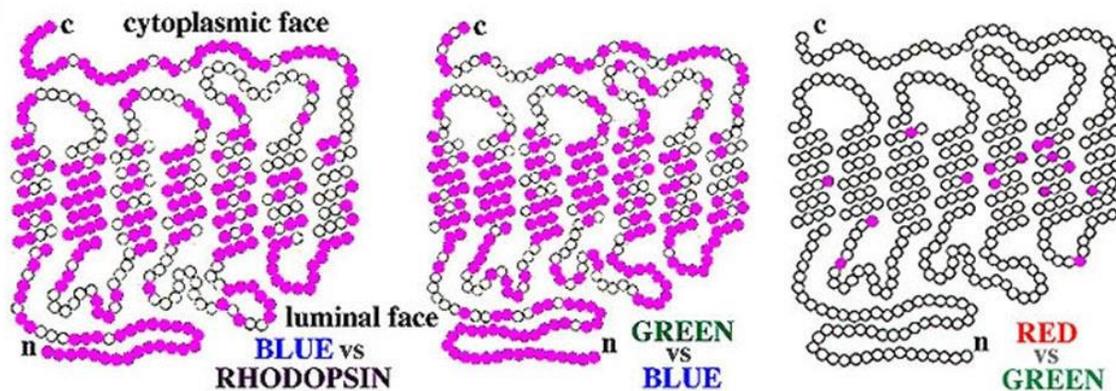


Abb. 6: Vergleich der Molekülstrukturen des Opsins. Links: Blau-Opsin vs. Rhodopsin, in der Mitte: Blau- vs. Grün-Opsin, rechts: Grün- vs. Rot-Opsin (farbige Punkte markieren die unterschiedlichen Aminosäuren, weiße Punkte die identischen Aminosäuren) (Nathans, Thomas, et al., 1986)

Jedes Opsin ist mit einem Vitamin-A-Derivat (11-cis-Retinal) gekoppelt. Nach Resorption eines Photons wandelt sich das 11-cis-Retinal in ein all-trans-Retinal um, somit wird das Opsin aktiviert und löst die Transduktionskaskade aus (Kolb, 1995e, 1995g). Nach Lichtstimulus werden die Außensegmente der Photorezeptoren hyperpolarisiert. Das Signal setzt sich über die Zellmembran zu den Innensegmenten fort. Die Photorezeptoren sind mit Bipolarzellen und Horizontalzellen verbunden. Die Aktivität der benachbarten Photorezeptoren wird durch die Signale der Horizontalzellen moduliert. Verschiedene Verbindungen zwischen den Photorezeptoren führen zu einem direkten Informationsaustausch

zwischen den umgebenden Stäbchen und Zapfen. Wenn ein Zapfen polarisiert wird (Hyperpolarisation bzw. Depolarisation), dann werden die Bipolarzellen stimuliert, welche entweder mit OFF-Center-Ganglienzellen oder mit ON-Center-Ganglienzellen verbunden sind. Das Licht führt zur Hyperpolarisation eines Zapfens sowie der ON-Bipolarzellen. Im Dunkeln kommt es zu einer Depolarisation eines Zapfens sowie der OFF-Bipolarzellen. Beim Übergang von Hell zu Dunkel werden die ON-Bipolarzellen gehemmt und die OFF-Bipolarzellen gleichzeitig aktiviert. Dieses ist möglich, weil ON- und OFF-Bipolarzellen verschiedene Rezeptoren, aber den gleichen Transmitter haben (Abb.7).

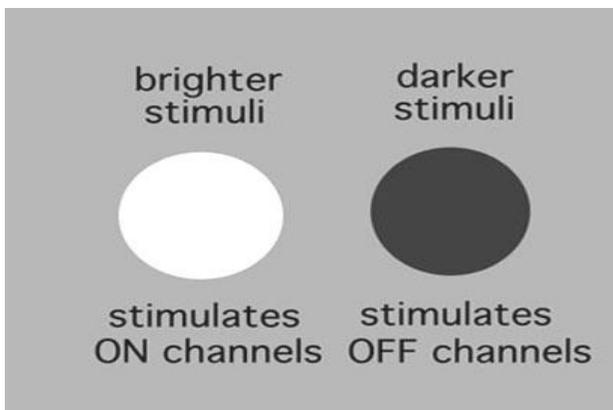


Abb. 7: Stimulation der ON- und OFF-Kanäle (Kolb, 1995b)

Es kommt dann zu einer spatialen und spektralen Interaktion von unterschiedlichen Interneuronen: den Bipolarzellen, den Amakrinzellen und den Horizontalzellen.

Die drei verschiedenen Horizontalzellen spielen nur eine Inhibitionsrolle. Ihre Hyperpolarisation bewirkt eine laterale Hemmung der kontaktierten Photorezeptoren und führt somit zu einer Signalverstärkung eines einzelnen Photorezeptors.

Die elf verschiedenen Typen von Bipolarzellen leiten das Signal aus den aktivierten Photozeptoren und Horizontalzellen in verschiedene ON- und OFF-Kanäle. Für die Stäbchen gibt es spezifische Stäbchen-ON-Bipolarzellen. Für die Rot- und Grünzapfen gibt es die depolarisierten Zapfen-ON-Bipolarzellen und die hyperpolarisierten Zapfen-OFF-Bipolarzellen. Im Zentrum besteht eine Eins-zu-

Eins-Verbindung zwischen Photorezeptoren und Bipolarzellen, wobei zur Peripherie hin mehrere Zapfen mit weniger Bipolarzellen Synapsen bilden. Für die Blauzapfen gibt es spezifische Blauzapfen-ON-Bipolarzellen. Die Existenz von OFF-Bipolarzellen für Blauzapfen ist umstritten (Kolb, 1995a, 1995b, 1995c, 1995d; Kolb et al., 1996).

Es sind 30 Typen von Amakrinzellen beschrieben. Die Hauptfunktion ist die intraretinale Informationsverarbeitung durch Synapsen mit Bipolar- und Ganglienzellen. Des Weiteren tragen die Amakrinzellen zur Modifizierung von Farb-, Kontrast-, Helligkeits- und Bewegungsinformation bei (Kolb, 1995f).

Postrezeptorale Signalverarbeitung

Man kann achtzehn verschiedene Typen von Ganglienzellen unterscheiden. Die Ganglienzellen kontaktieren ON- und OFF-Bipolarzellen (Abb. 8).

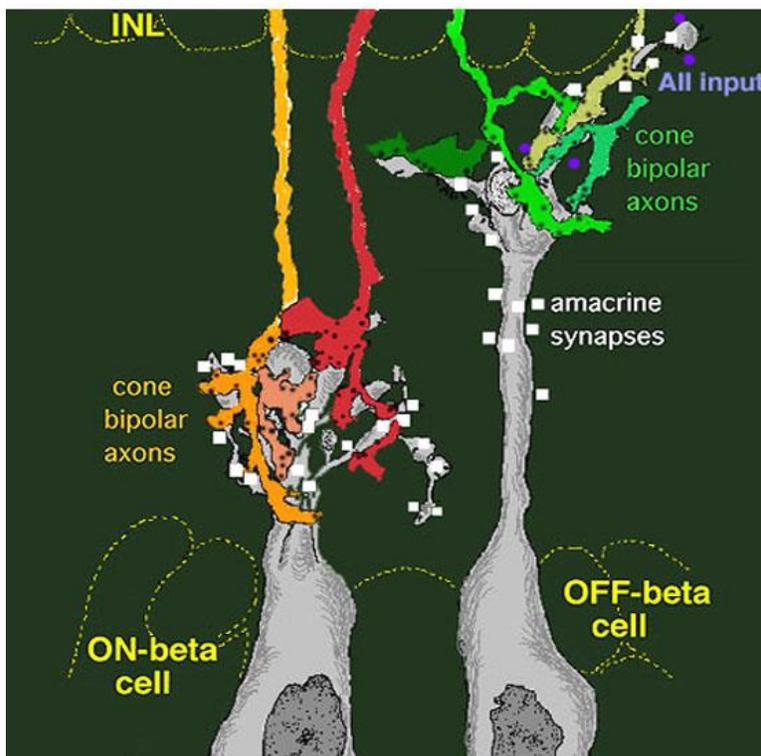


Abb. 8: Synapsen zwischen Bipolar- und Ganglienzellen (Kolb, 1995b)

Daher gibt es entsprechend ON- und OFF-Ganglienzellen, welche weiterhin die Information über den Sehnerv und das Chiasma opticum zum Corpus

geniculatum vermitteln. Die ON-Ganglienzellen leiten die Information „Licht heller“ und die OFF-Ganglienzellen die Information „Licht dunkler“ weiter. Dazu kann man zwei weitere spezifische Ganglienzellentypen unterscheiden: die tonischen oder parvozellulären und die phasischen oder magnozellulären Ganglienzellen. Die parvozellulären Ganglienzellen sind mehr farbantagonistisch und zeigen eine niedrige Nervenleitungsgeschwindigkeit, eine hohe räumliche und eine niedrige zeitliche Auflösung. Die magnozellulären Ganglienzellen sind weniger farbantagonistisch, zeigen eine höhere Nervenleitgeschwindigkeit sowie eine niedrige räumliche und eine hohe zeitliche Auflösung (Gouras, 1968, 1969).

Das Corpus geniculatum enthält sechs Schichten (4 parvozelluläre und 2 magnozelluläre), je drei für jedes Auge. Die P-Zelltypen übermitteln sowohl Farbinformation als auch Helligkeitsinformation. Die M-Zelltypen übermitteln ausschließlich Helligkeitsinformation (De Valois et al., 1967). Das Signal wird im Verlauf vom Corpus geniculatum weiter über die Sehstrahlung zur Area striata an den primären visuellen Cortex geleitet. Das phasische System projiziert zusätzlich zum Colliculus superior und in andere visuelle Kerne (Erb et al., 2006) (Abb. 9).

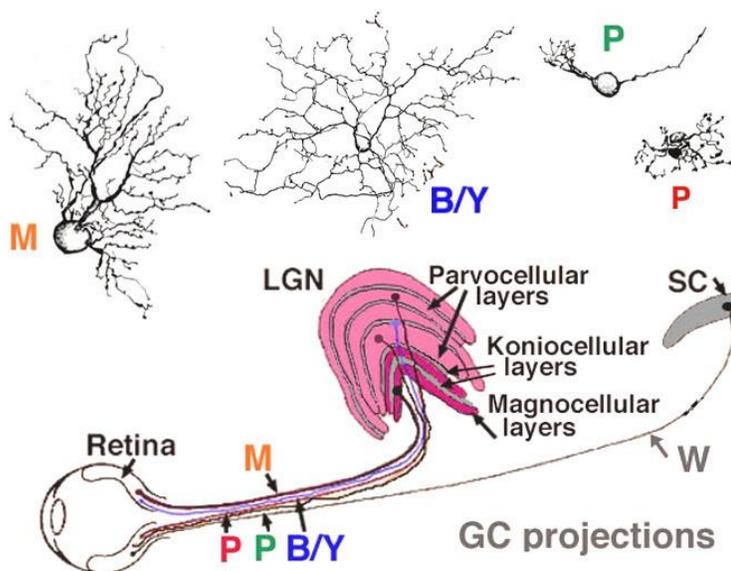


Abb. 9: Schematische Darstellung der Projektion der Ganglienzellen am Corpus geniculatum im Colliculus superior (Kolb, 1995c)

2.3 Angeborene und erworbene Farbsehstörungen

Man unterscheidet die kongenitalen Farbsehstörungen, welche genetisch bedingt sind, von solchen, die durch Schädigung der brechenden Medien, der Netzhaut oder des Sehnervs entstehen und zu den erworbenen Farbsehstörungen gehören.

2.3.1 Angeborene Farbsehstörungen

Die angeborenen Farbsehstörungen kann man in drei Kategorien einteilen:

a. Monochromasie (Achromatopsie congenita)

Bei den Monochromaten fehlen alle Zapfenpigmente. Dabei wird von den Betroffenen nur Schwarz und Weiß wahrgenommen, es werden keine bunten Farben erkannt.

b. Dichromasie

Dabei werden zwei Farbengruppen sowie Schwarz und Weiß mit Graustufen erkannt. Die Betroffenen kann man weiterhin in drei Gruppen unterteilen:

- Protanopen sind diejenigen, bei denen das langwellige Zapfenpigment fehlt und die die rote Farbe nicht wahrnehmen (Rotblindheit).
- Deuteranopen sind diejenigen, bei denen das mittelwellige Zapfenpigment fehlt und die die grüne Farbe nicht wahrnehmen (Grünblindheit).
- Tritanopen sind diejenigen, bei denen das kurzwellige Zapfenpigment fehlt und die die blaue Farbe nicht wahrnehmen (Blaublindheit).

c. anomale Trichromasie

Hierbei werden viele Farben aus allen Bereichen wahrgenommen, aber eine der drei Komponenten ist unterwertig. Es gibt drei Gruppen der anomalen Trichromasie:

- Protanomalie („Rotschwäche“)
- Deuteranomalie („Grünschwäche“)

- Tritanomalie („Blauschwäche“)

In der Praxis können die Dichromaten und die von Geburt an Trichromaten in drei Gruppen zusammengefasst werden:

- Protanope und Protanomale = Protane
- Deuteranope und Deuteranomale = Deuterane
- Tritanope und Tritanomale = Tritane (Deeb et al., 1993; Motulsky, 1988; Nathans, Sung, et al., 1992; Neitz et al., 2000; Sharpe et al., 1998)

Epidemiologie und Vererbung

In Westeuropa sind 8% der Männer und nur 0,4-0,5% der Frauen von einer angeborenen, x-chromosomal rezessiven Rot-Grün-Farbfehlsichtigkeit betroffen. Allerdings sind 15% der Frauen heterozygote Überträgerinnen. Von den Betroffenen sind in der männlichen Bevölkerung ca. 5% Deuteranomale und je ca. 1% Protanomale, Protanope und Deuteranope. Bei den Schwarzafrikanern sind ca. 3% der Männer und bei den Chinesen und den Japanern ca. 5% von einer Farbfehlsichtigkeit betroffen (Birch, 2012; Deeb et al., 1993; Krastel, 1995).

Die angeborenen Tritanen sind mit einer Häufigkeit im Bereich von 1:10000 bis 1:60000 sehr selten (Kalmus, 1955b). Es handelt sich um eine Mutation des Gens auf Chromosom 7, welches das Blauzapfenfotopigment (Cyanlab) dekodiert. Die Mutation wird autosomal dominant vererbt (Weitz, Miyake, et al., 1992; Weitz, Went, et al., 1992) (Tab. 1).

Tab. 1: Häufigkeit angeborener Farbsehstörungen (in Anlehnung an (Cole, 1972; Pease, 1998; Wright, 1952))

Art der Farbsehstörung	Männer	Frauen
Insgesamt	~8%	~0,5%
Anomale Trichromasie		
Protanomalie	1%	0,01%
Deuteranomalie	5%	0,4%
Tritanomalie	0,001%	0,001%
Dichromasie		
Protanopie	1%	0,01%
Deuteranopie	1,5%	0,01%

Tritanopie	0,008%	0,008%
Monochromasie		
Stäbchenmonochromasie	selten	selten
Zapfenmonochromasie	selten	selten
Atypische Monochromasie	sehr selten	sehr selten

Die beiden Gene, mit denen die Rot-Grün-Farbsehstörungen zusammenhängen, sind das OPN1LW („Opsin 1 Long Wave“), welches das Farbphotopigment Erythrolab kodiert, und OPN1MW („Opsin 1 Middle Wave“), welches das Farbphotopigment Chlorolab kodiert. Etwa 75% der Rot-Grün-Farbsehstörungen (100% aller Protanfarbfehlsichtigen und etwa 65% aller Deutanfarbfehlsichtigen) können mittels molekulargenetischer Testung dieser Gene ermittelt werden. Die Stäbchenmonochromasie wird autosomal rezessiv vererbt. Dafür sind Mutationen in CNGA3 in Chromosom 2, in CNGB3 in Chromosom 8 und in GNAT2 in Chromosom 1 verantwortlich (Deeb et al., 1993, 1996).

2.3.2 Erworbene Farbsehstörungen

Farbsehstörungen sind ein häufiges Begleitsymptom bei Erkrankungen der Netzhaut oder der aufsteigenden Sehbahn. Nach der Köllnerschen Regel führen (Köllner, 1912) Defekte der distalen Retina meistens zu Blau-Gelb-Farbsehstörungen, wobei Defekte in der aufgestiegenen Sehbahn hauptsächlich Rot-Grün-Farbsehstörungen zur Folge haben. Die erworbenen Farbsehstörungen können nach Verriest (Verriest, 1963) in drei Typen unterteilt werden. Der Typ I ist eine erworbene Rot-Grün-Störung. Der Typ II ist eine erworbene Rot-Grün-Störung, die jedoch von einer Blau-Gelb-Störung begleitet wird. Der Typ III ist eine erworbene Blau-Gelb-Farbsehstörung. Die erworbenen Farbsehstörungen sind überwiegend zumindest am Anfang einseitig und oft von einer Visusreduktion begleitet. Sie werden durch Trübungen der optischen Medien, Erhöhung des Intraokulardruckes (M. Mantyjarvi & M. Terasvirta, 1992), Erkrankungen der Retina und des Nervus opticus, Schädigung der Retina durch internistische Vorerkrankungen, altersbedingte Veränderungen sowie durch Intoxikationen hervorgerufen.

Die häufigsten Ursachen sind Intoxikationen durch Medikamente oder durch Chemikalien am Arbeitsplatz, z. B. bei Lösungsmittlexposition beim Lackieren von Autos (Bockelmann et al., 2003). In vielen Fällen kommt eine Blau-Gelb-Störung vor (Iregren et al., 2002). Es gibt zahlreiche Medikamente, welche eine Farbsehstörung verursachen können. Die hier relevanten Medikamentengruppen sind vor allem Antibiotika, Antirheumatika, Schwermetalle, Schmerzmittel, Tuberkulostatika und Phenotiazine (Jaeger, 1977; Li et al., 2008). Die Einnahme von Digoxin führte bei älteren Patienten bei 20-30% zu einer Rot-Grün-Störung und bei 20% zu einer Tritanstörung (Lawrenson et al., 2002). Ethambutol durch die Neurotoxizität und Carbamazepin oder Diphenylhydantoin durch die Reduktion der Aktivität der Inhibitionsrolle der Stäbchen und Zapfen verursachen oft Farbsehstörungen (Bayer et al., 1995; Vistamehr et al., 2007). Auch das Medikament Sildenafil citrat („Viagra“) führt zu einer transienten Tritanopie (Jagle et al., 2004). Auch Alkoholkonsum kann eine Blaustörung hervorrufen (Zrenner et al., 1986). Raucher, die über 20 Zigaretten pro Tag konsumieren, können verschiedene Farbsehstörungen haben (Bimler et al., 2004; Erb et al., 1999).

Viele Erkrankungen der Retina, wie die Stargardsche Erkrankung (M. Mantyjarvi & K. Tuppurainen, 1992), die vitelliforme Makuladegeneration (Zrenner, 1985) und die seröse Retinopathie (Maaranen et al., 2000) sowie retinale Erkrankungen durch Einwirkung von Sonnenlicht (Kaluiny et al., 2006) führen oft zu einer Störung des Farbsehens. Auch Erkrankungen des Nervus opticus, wie die Neuritis nervi optici, bei der eine Rot-Grün-Störung (Zrenner, 1985), und die autosomal dominante infantile Optikusatrophie, bei der meistens eine Tritanstörung vorliegt, gehören zu den erworbenen Farbsehstörungen (Jaeger, 1954; M. I. Mantyjarvi et al., 1992).

Zu den wichtigsten internistischen Vorerkrankungen, welche neben den systemischen Komplikationen auch zu Farbsehstörungen führen, gehört der Diabetes mellitus. Dabei kommt es in der Regel zu einer Blau-Gelb-Störung bzw. Blau-Grün-Störung. Die Farbsehstörung tritt vor der typischen klinischen Veränderung in der Retina auf (Fong et al., 1999; Greenstein et al., 1990;

Kinncar et al., 1972; Kurtenbach et al., 2002; Kurtenbach et al., 1994; Merbs et al., 1992; Roy et al., 1986; Thompson et al., 1979). Andere Erkrankungen sind die arterielle Hypertonie (Atonov et al., 1970; Luthke et al., 2010; Trusov, 1972), die HIV-Infektion (Kozak et al., 1994; Sommerhalder et al., 1998), die Sichelzellanämie (Roy et al., 1987), die Neurosyphilis (Behrens-Baumann et al., 1981) und Morbus Parkinson (Birch et al., 1998) sowie die Hämophilie (Jaeger et al., 1976).

Auch zerebrale Prozesse können nicht nur zur Visusreduktion und zu Gesichtsfelddefekten, sondern auch zu Störungen der Farbwahrnehmung führen (Pearlman et al., 1978; Rizzo et al., 1993; Vola et al., 1972).

2.4 Grundlagen des Farbsehens

Es gibt zwei vorherrschende Theorien, die das Farbsehen beschreiben:

Zum einen die Young-Helmholtz-Dreifarbentheorie (Helmholtz, 1867; Young, 1802). Es wurde postuliert, dass drei verschiedene Übertragungskanäle für die Farbinformation im visuellen System des Menschen vorliegen. Diese sind die drei Zapfenarten, die für Rot, Grün und Violett empfindlich sind. In der modernen Zeit konnte tatsächlich bestätigt werden, dass es drei verschiedene Fotopigmente gibt, welche spektralphotometrisch differenziert werden können: der kurzwellige Zapfen (S-Zapfen) mit dem Photopigment Cyanlab, der mittelwellige Zapfen (M-Zapfen) mit dem Photopigment Chlorolab und der langwellige Zapfen (L-Zapfen) mit dem Photopigment Erythrolab. So kann jeder wahrnehmbare Farbeindruck aus dem Empfindungsmaximum der entsprechenden Spektralfarben gemischt werden.

Zum anderen die Hering-Gegenfarbentheorie (Hering, 1874). Hering postulierte eine antagonistische Verarbeitung der Farbinformation auf retinaler Ebene. Er berichtete über drei antagonistische Kanäle: Grün und Rot, Blau und Gelb, Weiß und Schwarz. Seine Theorie konnte später durch die postrezeptorale Farbsignalverarbeitung auf Ebene der Ganglienzellen Bestätigung finden. Es ist

heute bekannt, dass die Ganglienzellen in zwei Systeme eingeteilt werden können. Das ist zum einen das tonische oder parvozelluläre System, welches überwiegend ein farbantagonistisches Verhalten im Sinne von Blau/Gelb bzw. Rot/Grün zeigt. Daneben steht das phasische oder magnozellanuläre System, welches überwiegend die Helligkeitsinformation verarbeitet.

Die beiden oben genannten Theorien ergänzen sich gegenseitig und können Aspekte der Farbverarbeitung gut und korrekt beschreiben.

2.5 Definition der Farbe

„Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge des Menschen strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann.“ (DIN, 2009)

Farbe ist komplex, weil sie nicht nur von der Wellenlänge abhängig ist (Kaiser & Boyton, 1996). Zur Beschreibung der Farbe sind im Prinzip drei Koordinaten erforderlich, welche von Psychologen im 19. Jahrhundert beschrieben wurden.

Farbton: Dieser wird durch die Wellenlänge bestimmt im Sinne von Rot, Grün, Gelb, Blau. Im Bild geht das Blau ins Violett über, da der Rotanteil der Farbe steigt (Abb. 10).



Abb. 10: Unterschiedliche Farbtöne von Blau

Sättigung: Dies ist die Farbmischung des Farbtons mit Weiß, Grau oder Schwarz. Je farbiger bzw. reiner eine Farbe ist, desto stärker ist sie gesättigt. Je geringer die Sättigung einer Farbe ist, desto farbloser und unauffälliger wirkt sie (Abb. 11).



Abb. 11: Unterschiedliche Sättigung

Helligkeit: Damit sind die verschiedenen Grautöne gemeint, auch jede Farbe kann als heller oder dunkler empfunden werden (Gouras, 1995; Greve, 2005-2010) (Abb. 12).



Abb. 12: Unterschiedliche Helligkeit

2.6 Farbsysteme

Über die Jahre sind mehr als 60 verschiedene Farbordnungen und Farbmodelle entwickelt worden. Ein Farbsystem ist eine Systematik zur Anordnung der Farbvalenzen, die auf unterschiedliche Art Farben erzeugen. Dies ist möglich durch „Mischung“ von Licht als Lichtfarben oder die Verwendung von Farbmitteln auf einem Trägermaterial als Körperfarben. Je nach Anwendungszweck kann eine unterschiedliche Anzahl von Grundfarben genutzt werden: Mindestens drei, aber auch vier oder mehr farbgebende Substanzen werden verwendet. Diese sind allerdings nicht mehr unabhängig voneinander.

Das Farbmodell entsteht aus dem abstrakten Farbsystem meist dreidimensional für die praktische Darstellung, die unterschiedlicher Form sein kann. Innerhalb der Modelle sind allen Farben eindeutige Zahlenwerte, die Farborte, zugeordnet (Wikipedia, 2015b). Die gebräuchlichsten Farbsysteme werden im Folgenden beschrieben.

2.6.1 CIE-Normfarbdreieck

Das CIE-Normvalenzsystem oder CIE-Normfarbsystem wurde von der Internationalen Beleuchtungskommission 1931 (CIE – Commission internationale

de l'éclairage) definiert, um eine Relation zwischen der menschlichen Farbwahrnehmung (Farbe) und den physikalischen Ursachen des Farbreizes (Farbvalenz) herzustellen (Adams et al., 1975).

Bei dem 1931 entwickelten CIE-Normfarbsystem blickt der gemittelte Beobachter auf eine Fläche mit einem Sichtfeld von 2° mittig zur Hauptrichtung, wobei sich das bei dem 1964 entwickelten CIE-Farbsystem auf das 10° -Sichtfeld des Menschen bezieht.

Im Verlauf wurde die zweidimensionale CIE-Normfarbtafel entwickelt, um den vom Betrachter wahrgenommenen dreidimensionalen Farbraum übersichtlicher darstellen zu können. Dabei wird die dritte Komponente z für jeden Punkt der Farbtafel rechnerisch aus den beiden anderen durch die Beziehung $x + y + z = 1$ ermittelt. Die hufeisenförmige Fläche möglicher Farben ist bei der CIE-Normfarbtafel auf einem Koordinatensystem aufgetragen, auf dem x - und y -Anteil (der CIE-genormten theoretischen Grundfarben X (Rot), Y (Grün) und Z (Blau)) einer beliebigen Farbe P direkt abgelesen werden können. Durch die Grundbedingung $x + y + z = 1$ lässt sich der z -Anteil jeweils rechnerisch ($z = 1 - x - y$) ermitteln. Die Gesamtheit möglicher Farben wird durch die das Hufeisen umgrenzende Spektralfarblinie (spektral reine Farben) sowie die untere Purpurlinie eingefasst (Wikipedia 2015).

Zentraler Bezugspunkt der Tafel ist der in jeder Farbmesssituation wesentliche Weißpunkt W . Der im Diagramm mit W gekennzeichnete Punkt ist derjenige theoretische Weißpunkt, der alle drei Farben zu je $1/3$ (x , y und $z = 0,333$) repräsentiert. Abhängig von der Beleuchtungssituation kann sich der Weißpunkt praktisch überall innerhalb des Hufeisens befinden. Technisch von Bedeutung ist nur die Black-Body-Kurve. Die Farben sind auf deren Verlauf als Temperatur eines idealen Strahlers (schwarzer Körper) in Kelvin angegeben. Ausgehend vom Weißpunkt können alle als farbtongleich empfundenen Farben auf einer Linie durch den Punkt P abgelesen werden. Auf der genau gegenüberliegenden Seite von W können die Komplementärfarben auf der verlängerten Linie $W-Q$ abgelesen werden. Der Punkt Q' , der in diesem Fall durch den Schnitt mit der

Purpurlinie definiert wird, stellt dabei die äußerste (reinste) Komplementärfarbe dar (Wikipedia, 2010) (Abb. 13).

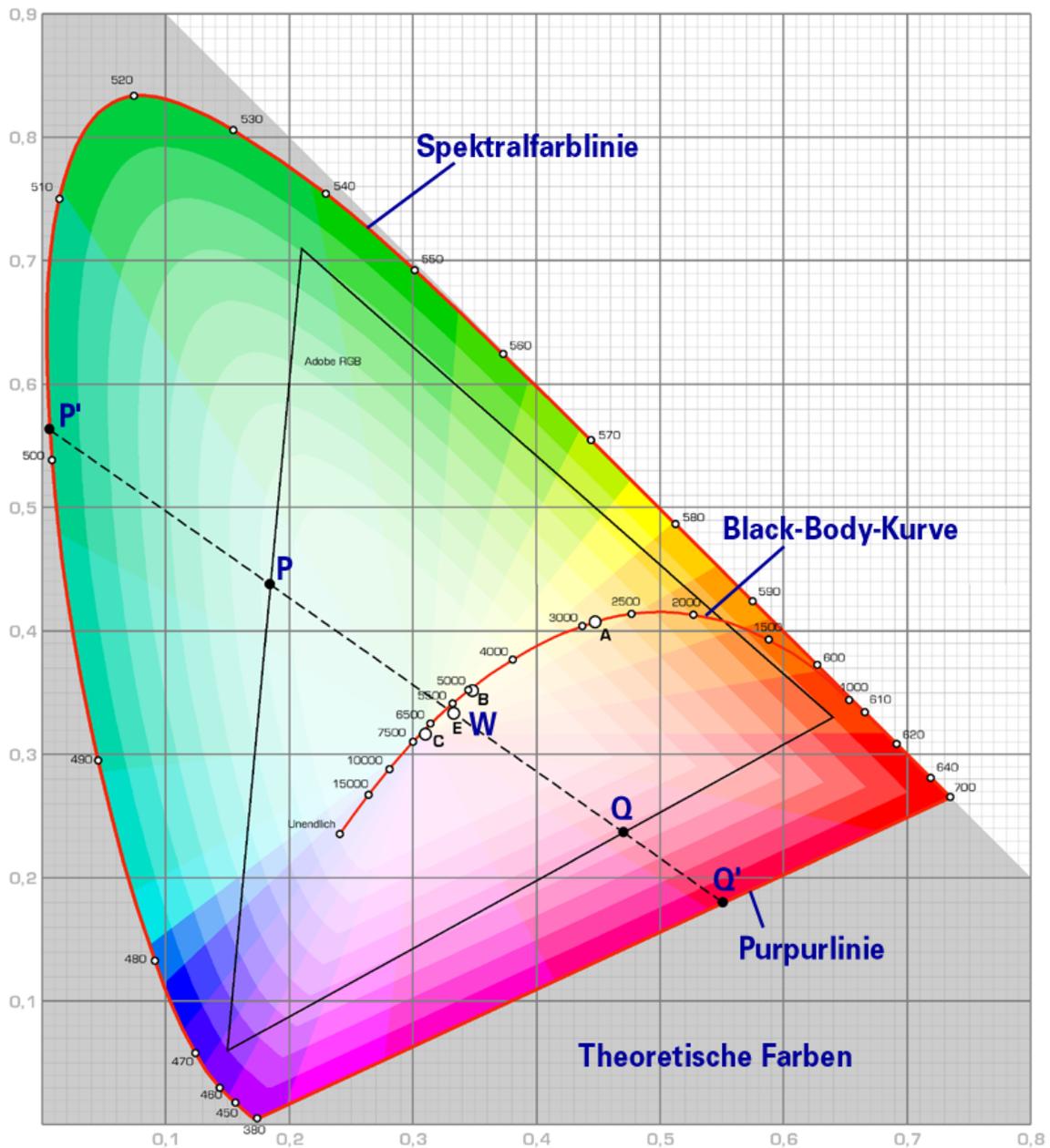


Abb. 13: CIE-Normfarbdreieck (Wikipedia, 2010)

Verwechslungsfarben/Verwechslungslinien

Fehlt ein Zapfentyp, werden diejenigen Farben verwechselt, die sich in den Signalen dieses Zapfentyps unterscheiden. Solche Farben liegen auf den Protan-, Deutan- oder Tritan-Verwechslungslinien. Unterwertigkeit eines Zapfentyps

verringert die Farbunterschiedsempfindlichkeit entlang seiner Verwechslungslinien.

Die Verwechslungslinien verbinden alle Punkte, welche die verbleibenden beiden Rezeptorentypen identisch reizen und treffen sich in jeweils einem Kardinalpunkt. Der Kardinalpunkt entspricht der „virtuellen Farbe“, an der die beiden jeweils anderen, normalen Zapfen gar nicht aktiviert werden.

Die Farben der Bildpunkte von Sehzeichen und Umfeld einer pseudoisochromatischen Tafel sind verschiedenen Abschnitten je einer Verwechslungslinie entnommen. Für die Erfassung von Protan-, Deutan-, Tritan- und Tetartanstörungen werden deshalb verschiedene Tafeln benötigt, bei denen es außer auf die Richtung der Verwechslungen im Farbdreieck auch auf die Distanz der Farborte und auf die Helligkeiten ankommt.

Bei Farbflecktests stellt der Patient seine eigenen Verwechslungslinien dar, indem er die Farbmarken schrittweise in der Reihenfolge seiner Wahrnehmung anordnet (Krastel et al., 2009) (Abb. 14).

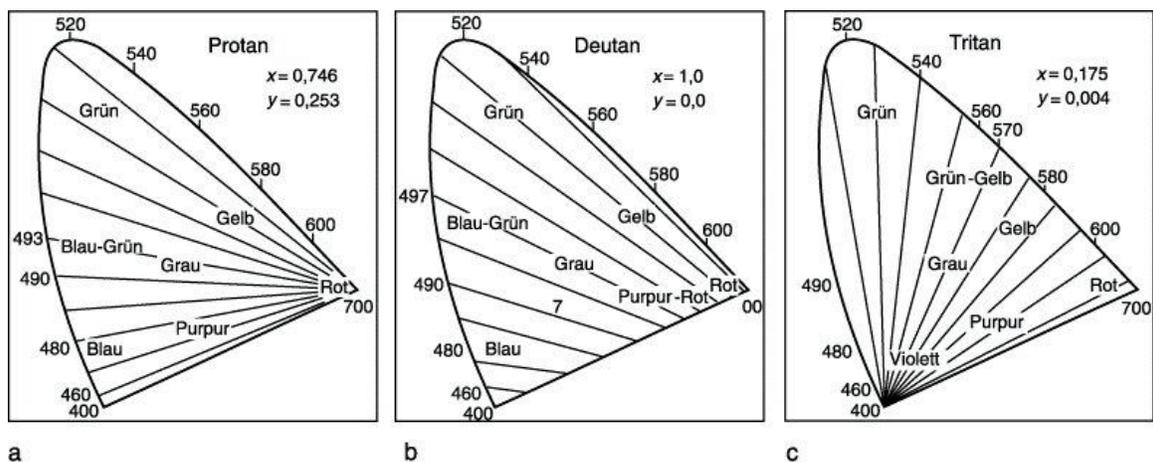


Abb. 14: Farbverwechslungsgeraden des Protanopen (a), Deuteranopen (b) und Tritanopen (c) (Spektrum.de, 2015).

2.6.2 Munsell-Farbraum

Das Munsell-Farbsystem (Munsell Color System oder Munsell Color Order System) wurde von dem Künstler Albert Henry Munsell (1858–1918) zwischen 1898 und 1905 veröffentlicht. Munsells Farbatlas wurde durch die Optical Society of America 1929 nachgemessen und -kalibriert.

Das Munsell-System (Abb. 15) ist eines der ersten vollständigen, am weitesten verbreiteten und heute noch genutzten Farbsysteme. Es ist vor allem in den USA und in Japan weitverbreitet. Dieses System ist unabhängig von der Beleuchtung und der Größe der betrachteten Farbfläche. Die drei Ordnungsprinzipien sind Hue (Farbton), Chroma (Sättigung) und Value (Wertigkeit, Helligkeit). Priorität dieses Systems ist der Farbton.

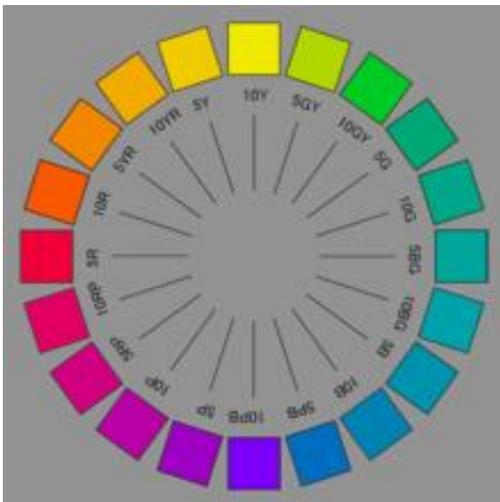


Abb. 15: Munsell-Farbsystem (Wikipedia, 2015)

Hue: Hue steht für die Wellenlänge oder die dominante Wellenlänge. Es gibt fünf Hauptbunttöne: Rot (R), Gelb (Y), Grün (G), Blau (B), Purpur (P) und fünf weitere Zwischenbunttöne: YR (Gelb-Rot), GY (Grün-Gelb), BG (Blau-Grün), PB (Purpur-Blau), RP (Rot-Purpur). Diese Aufstellung ergibt eine 10-teilige Farbfläche. Diese zehn Farbtöne werden abermals in zehn Abstufungen unterteilt. Für die Kennzeichnung der Bunttöne werden zu den

Buchstabensymbolen noch Zahlen (0 bis 10) zugesetzt: So werden die Farbtöne nach dem Muster 1RP, 5P, 3Y oder auch 7,5 GY, 2,5 PB bezeichnet.

Chroma: Chroma ist ein Munsell-Begriff für die Sättigung. Chroma wird in einer Skala von 0 bis zu verschiedenen Maxima angezeigt. Die Distanz vom Mittelpunkt zum Farbpunkt (zum Rand hin) ergibt eine zunehmende Sättigung, ohne Änderung von Helligkeit. Entsprechend der (visuellen) Konstruktion bleibt der Farbton erhalten und ändert sich nicht.

Value: Value wird in einer Zahlenskala von 1 (Schwarz) bis 10 angegeben (Friendly et al.). Diese Skala repräsentiert die Reflexion und die Helligkeit.

Zur Benennung erhält jedes Farbmuster im Munsell-System, also jede dargestellte Farbe ein Farbzeichen der Form H V/C, wobei H (Hue) für Buntton, V (Value) für Helligkeit und C (Chroma) für Sättigung steht (Abb. 16).

Beispielhaft sei die Farbe 2,5 YR 5/10 beschrieben, ein Gelb-Rot, welches zum Rot tendiert, eine mittlere Helligkeit hat und maximal gesättigt erscheint (Gouras, 1991; Wikipedia, 2015).

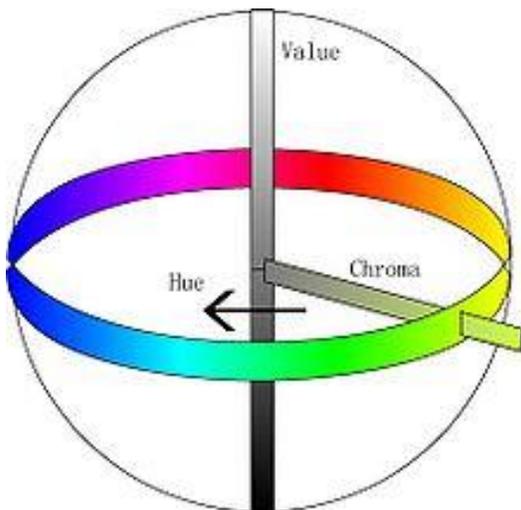


Abb. 16: Munsell-Farbsystem

Die rasche Entwicklung der Fernseh- und Computer- sowie Drucktechnik führte auch zur Entwicklung von geräteabhängigen Farbmodellen, wie des RGB- und des CMY/CMYK-Farbmodells (Gierling, 2001).

2.6.3 RGB-Farbmodell

Es handelt sich hierbei um ein Farbkoordinatensystem mit drei Primärfarben: R (Rot), G (Grün) und B (Blau). Jede Primärfarbe kann einen Intensitätswert zwischen 0 (aus/am niedrigsten) und 1 (ein/am höchsten) aufweisen. Wenn diese Primärfarben in unterschiedlichen Intensitätsgraden gemischt werden, entsteht eine Vielzahl von Farben. Die Palette dieser Farben bildet den würfelförmigen RGB-Farbraum. Die Ecke des RGB-Farbwürfels, die sich im Ursprung des Koordinatensystems befindet, entspricht der Farbe Schwarz, während die dem Ursprung diagonal gegenüberliegende Würfecke der Farbe Weiß entspricht. Die diagonale Linie zwischen Schwarz und Weiß entspricht allen Grautönen zwischen Schwarz und Weiß und wird als Grautreppe bezeichnet. Jede beliebige Farbe innerhalb des Würfels kann anhand ihrer Koordinaten festgelegt werden: (r,g,b) , z. B. $(0,0,0)$ für Schwarz, $(1,1,1)$ für Weiß, $(1,1,0)$ für Gelb usw. Bei der Farbspezifikation nach dem RGB-Modell handelt es sich um einen additiven Prozess. Man beginnt mit Schwarz und fügt die entsprechenden Primärkomponenten hinzu, um eine gewünschte Farbe zu erzeugen (Zhigang Xiang, 2000) (Abb. 17).

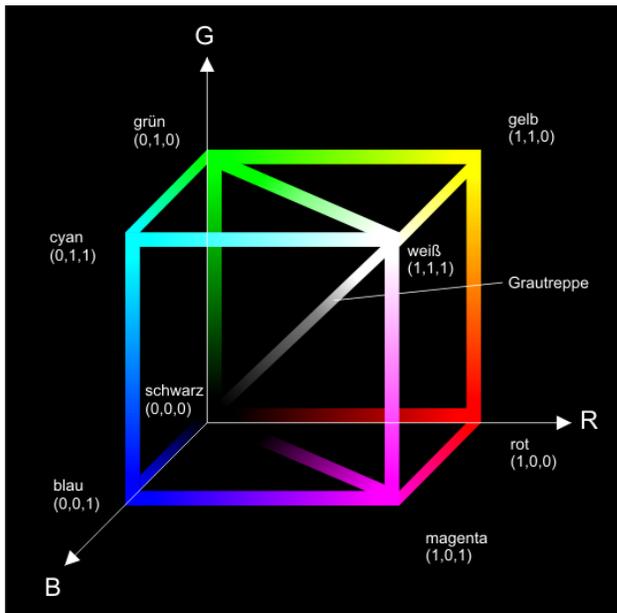


Abb. 17: RGB-Farbsystem (Computerartikel-Archiv, 2009)

Der Adobe-RGB-(1998)-Farbraum ist eine besondere Form des RGB-Farbraums mit deutlichen Verbesserungen bei den Türkis- und Grün-Tönen (Wikipedia, 2015d).

2.6.4 CMY/CMYK-Farbmodell

Das CMY-Farbmodell ist ein Komplementärfarbenmodell. Die Farben werden mithilfe eines subtraktiven Prozesses definiert. Man beginnt mit Weiß und entfernt die entsprechende Primärkomponente, um die gewünschte Farbe zu erzeugen. Wenn zum Beispiel Rot von Weiß subtrahiert wird, besteht die verbleibende Farbe aus Grün und Blau und wird als Cyan bezeichnet. Die Primärfarben sind C (Cyan), M (Magenta) und Y (Yellow, Gelb). Die am Punkt $(0,0,0)$ befindliche Ecke des CMY-Farbwürfels entspricht Weiß, während die Würfecke am Punkt $(1,1,1)$ Schwarz darstellt (Abb. 18).

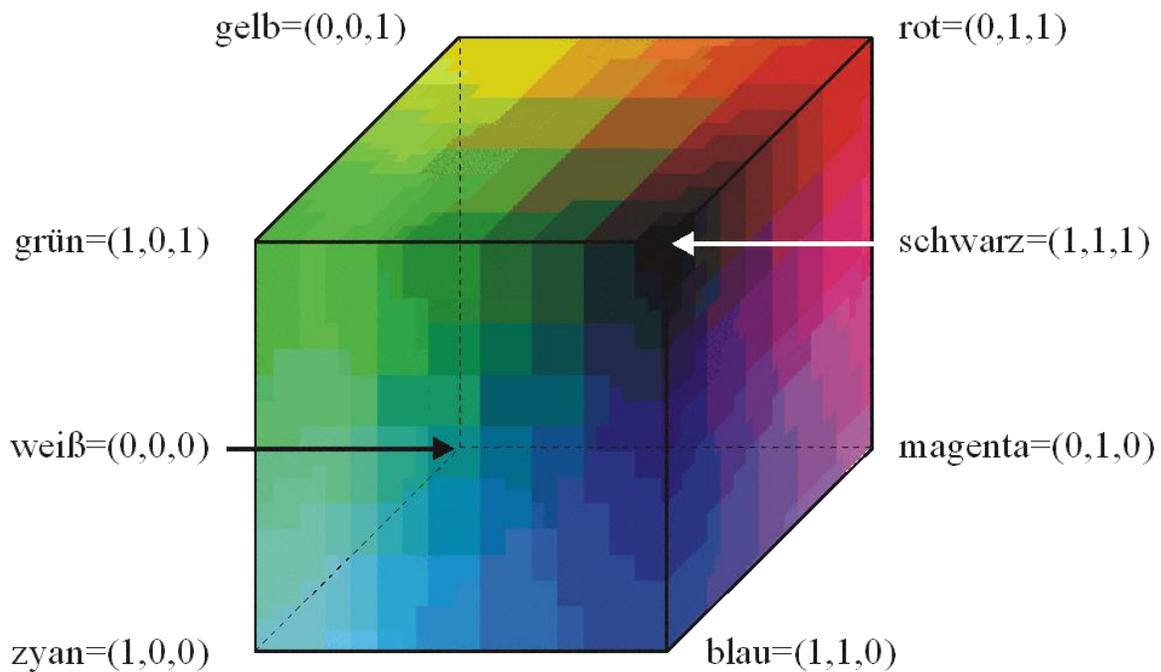


Abb. 18: CMY-Farbmodell (Dortmund, 1999)

2.7 Untersuchungsmethoden bei Farbsehstörungen

Die Untersuchung des Farbsehens kann mit verschiedenen Methoden durchgeführt werden. Man kann mittels pseudoisochromatischer Tafeln, Farbfleck- oder Farbordnungstests, Verfahren mit Lichtreizen breiter spektraler Bandcharakteristik, Farbtests mit spektral schmalbandigen Lichtreizen, Leuchtdiodentests, Bildschirmverfahren, Anomaloskop sowie Farbperimeter eine Farbsehstörung detektieren (Krastel et al., 2009).

2.7.1 Pseudoisochromatische Tafeln

Zum Screening zu angeborenen Farbsehstörungen werden die pseudoisochromatischen Farbtafeln verwendet. Bei diesen Tafeln gibt es vier verschiedene Typen (Gouras, 1991):

- a. Transformationstafeln: Bei diesen Tafeln nimmt eine Person ohne Farbsehstörung ein Zeichen wahr, und bei Vorliegen einer Farbsehstörung wird ein anderes Zeichen wahrgenommen (Abb. 19).
- b. Tafeln mit verschwindenden Zeichen: Bei diesen Tafeln nimmt eine Person ohne Farbsehstörung ein Zeichen und eine Person mit Farbsehstörung kein Zeichen wahr (Abb. 20).
- c. Tafeln mit versteckten Zeichen: Bei diesen Tafeln nimmt eine Person ohne Farbsehstörung keine Figur und eine Person mit Farbsehstörung ein Zeichen wahr (Abb. 21).
- d. Diagnostische Tafeln: Ein Zeichen wird besser als das andere von Personen mit Farbsehstörungen wahrgenommen (Abb. 22).

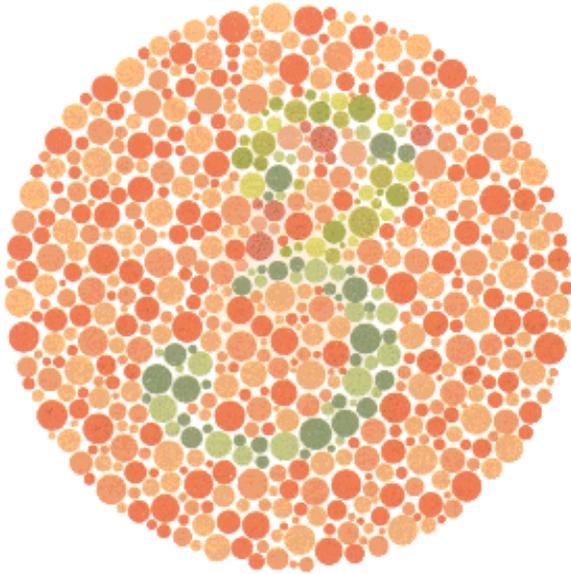


Abb. 19: Beispiel einer Transformationstafel (Farbnormale sollten die Nummer 3 lesen können. Rot-Grün-Fehlsichtige sehen die Nummer 5).

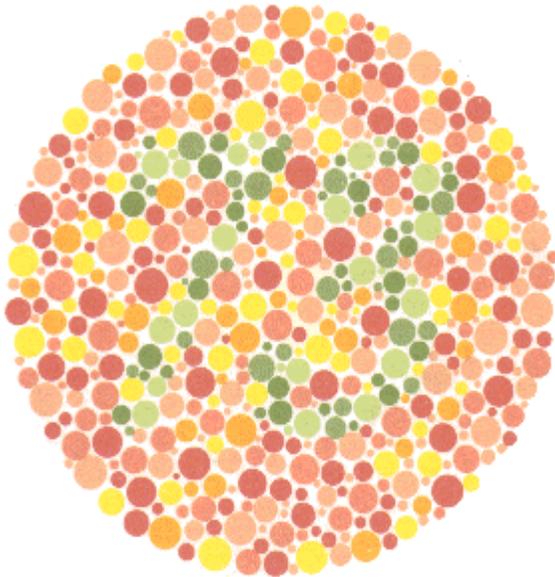


Abb. 20: Beispiel einer Tafel mit verschwindenden Zeichen (Farbnormale lesen die Nummer 73. Die Mehrzahl der Rot-Grün-Farbfehlsichtigen oder Farbenblinden erkennen die 73 nicht oder sehen eine andere Zahl).

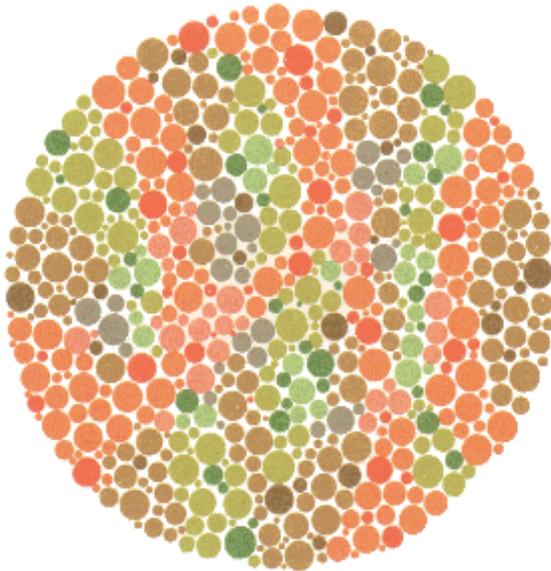


Abb. 21: Beispiel einer Tafel mit versteckten Zeichen (Farbnormale und total Farbenblinde können kein Zeichen erkennen. Die Mehrheit der Rot-Grün-Fehlsichtigen erkennt hier die Zahl 45).

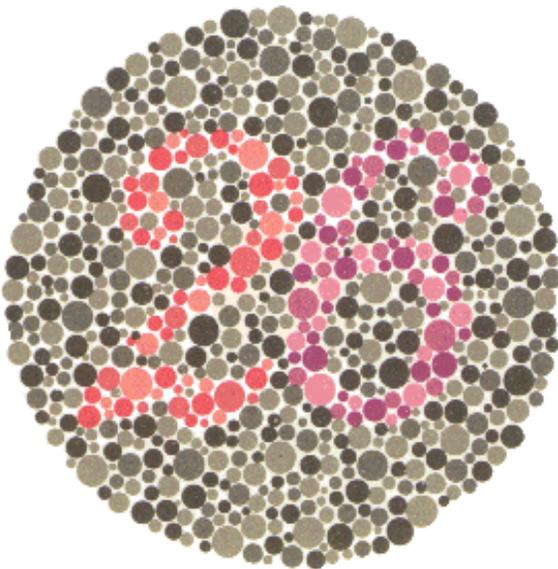


Abb. 22: Beispiel einer diagnostischen Farbtafel (Farbnormale sollten die Zahl 26 erkennen. Von Protanopen und stark Protanomalen wird eine 6 gesehen. Gering Protanomale sehen sowohl die 2 als auch die 6, wobei die 6 deutlicher wahrgenommen wird. Deuteranope und stark Deuteranomale können nur die Ziffer 2 lesen. Im Falle einer schwachen Deuteranomalie wird wieder die Zahl 26 erkannt, aber hier wird die Zahl 2 deutlicher wahrgenommen als die 6 (Rand et al., 1956)).

Der Proband hat sich zunächst mit dem Charakter der Optotypen vertraut zu machen. Daher wird eine Demonstrationstafel vorgegeben, welche auch bei Vorliegen einer Farbsehstörung gelesen werden kann (Krastel et al., 2009). Für Rot-Grün-Störungen sind die Ishihara-Tafeln (Nakajima et al., 1960), die Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Tafeln, die Standard Pseudoisochromatic Plates I (Hovis et al., 1996), die American Optical Company Plates nach Hardy, Rand und Rittler (Rand et al., 1956), der City University Color Vision Test (Birch, 1997a) und der Neitz Color Vision Worksheet Test geeignet. Für Blausinnstörungen sind die Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Tafeln (Broschmann, 2009; Velhagen et al., 1995, 1997, 2000), die Standard Pseudoisochromatic Plates (SPP) II (Pinckers et al., 1985), die American Optical Company Plates nach Hardy, Rand und Rittler (AO HRR) sowie das Lanthony Tritan Album geeignet (Lanthony, 1986; Zrenner, 1987).

Für Kinder gibt es den Matsubara-Kojima-Kinder-Farbtafeltest, der ab dem 3. Lebensjahr verwendet werden kann (Krastel, 1995).

Die Untersuchung des Farbsehens mittels pseudoisochromatischer Tafeln sollte immer unter standardisierten Untersuchungsbedingungen erfolgen. Die Testung des Farbsehens mittels Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Tafeln sollte in 70 cm Abstand für 15 sec unter Tageslicht erfolgen. Bei den Ishihara-Tafeln ist ein Untersuchungsabstand von 75 cm nötig. Anstelle des Tageslichts sind auch Leuchtröhren mit kontinuierlicher, tageslichtähnlicher Emission für Farbmusterungszwecke, z. B. Philips TL 54, TL 55, TL 57 oder Osram Biolux geeignet. Die Farbtemperatur soll über 5000°K bis 6800°K liegen. Die Tafeln sind in etwa rechtem Winkel zur Blickrichtung vorzulegen. Die vom Hersteller empfohlene Beobachtungszeit beträgt für die Ishihara-Tafeln drei Sekunden und für die Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Tafeln 15 Sekunden (Krastel, 2007; Krastel et al., 2009).

Velhagen/Broschman/Kuchenbecker-Tafeln

Ursprünglich sind die Farbtafeln von Stilling entwickelt worden. Ab der 15. Auflage sind diese von G. Weil, von 1929 bis 1939 von E. Hertel (18. bis 20. Auflage), von 1952 bis 1974 von Velhagen (21. bis 25. Auflage) und ab 1985 (27. Auflage) von Broschmann und seit 2011 (34. Auflage) von Kuchenbecker aktualisiert und herausgegeben worden. Die Sensitivität und Spezifität der einzelnen Auflagen ist unterschiedlich, sodass einige Auflagen in visuell auffälliger Weise voneinander abweichen können. Daher sollte die benutzte Auflage immer angegeben werden. Die Tafeln erscheinen im Georg Thieme Verlag (Broschmann, 2009; Heinsius, 1973; Krastel, 1995; Stilling, 1877).

Ishihara-Tafeln

Der Ishihara-Test ist der meist verbreitete Screening-Test zur Detektion einer Rot-Grün-Farbsehstörung (Birch, 1997b). Der Test wurde erstmals 1906 veröffentlicht und war der erste kommerziell hergestellte Test (Dain, 2004). Es hat sich gezeigt, dass es von Auflage zu Auflage sowie mit der Alterung der pseudoisochromatischen Tafeln zu Unterschieden in der Helligkeit, im Farbton und in der Sättigung kommt (Hyon et al., 2005).

2.7.2 Farbordnungstests

Die Farbordnungstests dienen zur Detektion von erworbenen Farbsehstörungen. Es werden kleine Farbtöpfchen dargeboten, und der Betrachter wird aufgefordert, die Farben in einer seiner Wahrnehmung entsprechenden Reihenfolge zu sortieren. Damit kann man auch eine angeborene von einer erworbenen Störung differenzieren. Bei den angeborenen Farbsehstörungen zeigen sich parallele Verwechslungsgeraden, wobei es bei erworbenen Störungen häufig zu einer erratischen multidirektionalen Anordnung von Verwechslungsgeraden kommt.

Die gebräuchlichsten Farbordnungstests sind:

- der Panel-D-15-Test in der saturierten und desaturierten Form (nach Farnsworth und nach Lanthony (Abb. 23)

- der Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Abb. 24)
- der 28-Hue-Test nach Roth (Lachenmayr B., 2006).



Abb. 23: Panel D-15-Test ("Colour vision test," 2004)



Abb. 24: Der Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Aguilera, 2010)

Dazu gibt es die folgenden Tests, die seltener verwendet werden:

- City-University-Test nach Fletcher
- Farbtestscheibe nach Guilino und Ledl (Krastel et al., 2009).

Die Farbflecktests sind in der Erfassung von Rot-Grün-Störungen weniger sensitiv als Farbtafeln. Die Prüfmarken sind bei Farbflecktests größer, als die spatiale Auflösung des Rot-Grünsinns es erfordert. Farbflecktests sind besonders für die Untersuchung des Blausinns, weniger des Rot-Grün-Sinns geeignet, weil das kurzwellige System in der Netzhaut weitmaschiger als das Rot-Grün-System ist (Krastel, 2007).

2.7.3 Anomaloskope

HMC-Anomaloskop

Das HMC-Anomaloskop ermöglicht die qualitative und quantitative Diagnostik von angeborenen sowie erworbenen Farbsehstörungen. Durch verschiedene Gleichungen ist die Untersuchung des Rot-Grün-Sinns und des Blausinns möglich.

Die Rayleigh-Gleichung dient zur Untersuchung des Rot-Grün-Sinns:

Grün (549nm) + Rot (666nm) = Gelb (589 nm).

Die Moreland-Gleichung eignet sich zur Untersuchung des Blausinns:

Blau (436nm) + Grün (490nm) = Zyan (480 nm) + Gelb (589 nm).

Das verwendete Prinzip ist die additive Farbmischung und die Metamerie. Es wird dem Beobachter ein kreisförmiges Prüffeld vorgegeben. In der oberen Hälfte überlagern sich zwei spektrale Farbreize. In der unteren Hälfte wird ein spektraler Farbreiz angeboten, welcher der Farbmischung der oberen Hälfte gleicht. Das Mischungsverhältnis des Mischlichtes oben sowie die Helligkeit des unteren Teils werden variiert, bis subjektiv beide Teile als gleich empfunden werden (Abb. 25).

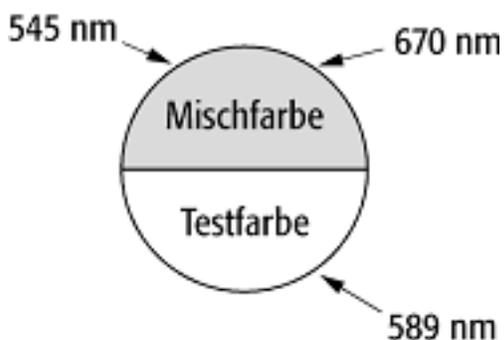


Abb. 25: Kreisförmiges Prüffeld des HMC-Anomaloskops (Spektrum, 2015)

Die Rayleigh-Gleichung

In dem horizontal geteilten Prüffeld befinden sich das Mischfeld aus Grün und Rot oben und das Vergleichsfeld mit Gelb unten. Das Mischfeld kann von 0 bis 73 eingestellt werden. 73 bedeutet eine grünfreie Einstellung des Mischfeldes.

Die Einstellung bei den Normalsichtigen beträgt 34 bis 46 Skalenwerte. Als Mittelnormgleichung ist der Mittelwert 40/15 festgelegt. In diesem Fall beträgt der Anomalquotient 1,0.

Nach dem Fachnormenausschuss Farbe sind Probanden von

0 bis < 0,7	protanomal,
0,7 bis 1,4	normal,
> 1,4 bis unendlich	deutanomal

(Oculus).

Nagelanomaloskop

Das Nagelanomaloskop (Abb. 26) wurde 1907 von dem deutschen Ophthalmologen und Physiologen Willibald A. Nagel (1870–1911) erfunden.



Abb. 26: Nagelanomaloskop

Die Untersuchung mit dem Nagelanomaloskop ist ein Hilfsmittel zur Differenzialdiagnose von angeborenen und erworbenen Farbsehstörungen.

Das Nagelanomaloskop hat ein Gesichtsfeld mit dem Durchmesser von $2^{\circ} 10'$. In der unteren Hälfte wird ein Natriumgelb mit der Wellenlänge von 589,3 nm dargeboten, dessen Leuchtdichte zwischen 0 und einem Maximum verändert werden kann. In der oberen Hälfte wird entweder Quecksilbergrün von 546 nm oder Lithiumrot von 670,8 nm bzw. Mischungen dieser beiden Lichter geboten. Die Beobachtungszeit darf drei Sekunden nicht überschreiten. Dem Probanden

werden fünf Gleichungen vorgelegt: die Mittelnormgleichung, die Deuteranomalien- und die Protanomalengleichung sowie die beiden Endgleichungen, d. h. reines Grün bzw. reines Rot im Vergleich mit Gelb. In jedem Fall sind als erstes etwaige Helligkeitsunterschiede durch Nachstellen der Gelbschraube durch den Untersucher zu beseitigen. Erst dann wird gefragt, ob die beiden Hälften des Gesichtsfeldes gleich- oder verschiedenfarbig sind.

Wird die Mittelnormgleichung angenommen (die beiden Halbfelder werden als halbfarbig erkannt), so es handelt sich beim Probanden entweder um einen normalen Trichromaten oder um einen Dichromaten bzw. vereinzelt um einen Fall von Extrem anomalie. Wird die Mittelnorm verworfen (die beiden Halbfelder werden verschiedenfarbig gesehen), so lassen wir sie benennen, und zwar stets in der Reihenfolge obere Hälfte/untere Hälfte. Wenn die Antwort „rot/grün (oder gelb)“ lautet, so ist eine Deuteranomalie anzunehmen, bei der Angabe „grün/rot (oder gelb)“ Protanomalie. Endgültig darf dies aber erst nach der Vorlage von im Allgemeinen vier weiteren Einstellungen und deren entsprechender, übereinstimmender Beantwortung diagnostiziert werden (F.Hollwich, 1977).

Weitere Anomaloskope sind das Neitz-Anomaloskop, das BKG-IF2-Anomaloskop und das Spectrum Color Vision Meter (Krastel et al., 2009).

2.8 Tablet-PC

2.8.1 Funktionsweise von Tablet-PCs

Ein Tabletcomputer ist ein tragbarer, flacher Computer in besonders leichter Ausführung mit einem Touchscreen, aber, anders als bei Notebooks, ohne ausklappbare mechanische Tastatur. Ein Tablet-PC lässt sich durch die leichte Bauart und den berührungsempfindlichen Bildschirms leicht handhaben. Die Geräte ähneln in Leistungsumfang, Bedienung und Design modernen Smartphones und verwenden meist ursprünglich für Smartphones entwickelte Betriebssysteme (Wikipedia, 2015e).

Tablet-PCs sind multimedial und besonders vielseitig. Zusätzlich zu klassischen Office-Programmen zum Verfassen von Texten, Erstellen von Tabellen etc. verfügen sie vor allem über unzählige Funktionen zur Unterhaltung.

Durch die zahlreichen Applikationen, die bereits im Tablet-PC integriert sind bzw. integriert werden können, lässt sich jederzeit gewicht- und platzsparend auf eine Vielzahl von Büchern und Zeitschriften zugreifen.

Aufgrund einer sehr guten Bildauflösung und auch eines Audio-Anschlusses für Kopfhörer sind Tablet-PCs zur Wiedergabe von Filmen und Videoclips geeignet. Durch das Touchscreen-Display sind die Tablet-PCs bedienfreundlich und besitzen eine hohe Reaktionsfähigkeit.

Bild- und Film-Aufnahmen sind über integrierte Kameras möglich und können mit der passenden Applikation auch bearbeitet werden. Eine zweite Kamera dient in erster Linie der Videotelefonie, ein weiteres Feature, das viele Tablet-PCs ermöglichen.

Die elementar wichtigste Funktion bleibt jedoch die Internetfähigkeit der Tablet-PCs. Diese ermöglicht die Multifunktionalität der Tablet-PCs, denn so können Bücher, Filme, Spiele etc. schnell und einfach bezogen werden. Auch die Kommunikation via E-Mail, Videotelefonie etc. ist möglich. Die Anzahl der Funktionen eines Tablet-PCs kann durch den Zugriff auf die dem jeweiligen Betriebssystem zugeordneten App-Stores beliebig erweitert werden (Tablet-PCs.eu, 2015b).

Der US-amerikanische Technologie-Hersteller Apple brachte den ersten seiner Tablet-PCs unter dem Namen iPad® 2010 auf den Markt (Abb. 27).



Abb. 27: Darstellung eines iPads®

Vorausgegangen war zunächst die PDA-Reihe (persönlicher digitaler Assistent) Newton in den 1990er Jahren und 2007 schließlich das Smartphone-Modell iPhone®, das als eine Folgeentwicklung dieser Mini-Computer-Technologie zu betrachten ist.

Das iPad® der ersten Generation wird mit einem Apple-A4-Prozessor mit einer Taktfrequenz von 1 GHz betrieben und hat einen Arbeitsspeicher von 256 MB. Für den Flash-Speicher stehen drei Varianten zur Auswahl, mit 16 GB, 32 GB oder 64 GB Kapazität. Das iPad verfügt über eine Wi-Fi-Schnittstelle für den Internetzugang innerhalb von WLAN-Netzwerken und ist zudem geeignet für die mobile Internetnutzung über den 2,5G- und den 3G-Funkstandard. Die Bedienung erfolgt über das kapazitive 9,7-Zoll-Multi-Touch Display, eine Kamera ist in der ersten Generation nicht integriert. International konnte das iPad® seit Sommer 2010 erworben werden.

Das iPad2® kam im Jahr 2011 auf den Markt und wartete mit diversen Neuerungen und Verbesserungen auf. Integriert ist hier ein Dual-Core-A5-Prozessor mit 512 MB Arbeitsspeicher. Außerdem verfügt das Gerät über zwei digitale Kameras sowie ein 3-Achsen-Gyroskop, das Rotation erfassen kann und den Bildschirm entsprechend ausrichtet.

2012 erschien das New iPad – oder auch iPad3® – als erneute Weiterentwicklung mit Dual-Core-A5X-Prozessor, 1024 MB Arbeitsspeicher,

Quad-Core-Grafikchip für noch schärfere HD-Bildschirmauflösung sowie mit leistungsstärkeren Kameras (inklusive Gesichtserkennung) und einer Variante des bereits im iPhone 4S® integrierten Sprachsteuerungsprogramms Siri für das Diktieren von Texten (Tablet-PCs.eu, 2015a). Inzwischen sind 2012 das iPad 4® sowie das iPad mini® entwickelt worden. 2013 erschienen auf dem Markt das iPadAir® sowie das iPad mini® mit Retina Display und 2014 das iPadAir2® und das iPadmini3®. Das iPad Air® verfügt ein 9,7"-Retina-Display, das neue iPad Air 2® bietet dazu ein Touch-ID, den schnellen A8X-Chip und neue Kameras. Das Design ist stets dünn und leicht. Das iPadAir® und iPadAir 2® sowie die leichteren neueren Modelle des iPad mini® bieten zusätzlich eine i-Sight-Kamera, womit eine Gesichtserkennung und sowie HDR-Fotos (High Dynamic Range Image (HDRI), „Bild mit hohem Dynamikumfang“) und Panorama-Bilder gewährleistet werden können (iPad, 2015a, 2015b).

Alle iPad-Generationen basieren auf dem Apple eigenen, auch für das iPhone verwendeten Betriebssystem iOS, welches seit dem 29. Juli 2007 von Apple Inc. verwendet wird. Es ist multitaskingfähig, sodass verschiedene Anwendungen gleichzeitig ausführbar sind und kann durch eine Vielzahl von Applikationen aus dem Apple Store ergänzt werden (Diffen, 2015; Tablet-PCs.eu, 2015a).

2.8.2 Farbdisplay von Tablet-PCs – Aufbau und Funktionsweise

Farbdisplay

Die verschiedenen Tablet-PC-Modelle zeigen Unterschiede hinsichtlich der Farbqualität, da diese auch über verschiedene Displays verfügen.

Das iPad1® und iPad2® verfügen über ein 9,7“-Multi-Touch-Widescreen-Display mit LED (Light-emitting Diode, dt. licht-emittierende Diode, auch Lumineszenz-Diode), mit Hintergrundbeleuchtung, Hochglanzanzeige und IPS (In-Plane-Switching)-Technologie sowie mit einer Auflösung von 1024x768 Pixeln bei 132 ppi. Das iPad 3® verfügt über ein Retina-Display mit 9,7“-Multi-Touch-Hochglanz-Widescreendisplay mit LED-Hintergrundbeleuchtung und IPS-Technologie sowie mit einer höheren Auflösung von 2048x1536 Pixeln bei 264

ppi (iPad, 2015b). Die weiterentwickelten iPads, iPad mini 2 und 3®, und iPad Air® und iPad Air 2®, verfügen ebenfalls über ein Retina-Display und weisen höhere Auflösungen auf. Als Retina-Display bezeichnet das US-amerikanische Unternehmen Apple Bildschirme mit einer Pixeldichte, die so hoch ist, dass das menschliche Auge aus einem typischen Betrachtungsabstand nicht in der Lage sein soll, einzelne Pixel zu erkennen. Alle bisher von Apple verbauten Retina-Displays sind Flüssigkristallanzeigen (LCDs) mit In-Plane Switching (IPS). Die folgende Tabelle (Tab. 2) gibt eine Übersicht über ihre Punktdichten (in Pixel pro Zoll) und Bildschirmauflösungen (Wikipedia, 2015c):

Tab. 2: Darstellung der Punktdichten (in Pixel pro Zoll) und Bildschirmauflösungen von verschiedenen iPad®-Generationen (Wikipedia, 2015c)

Produkt	Punktdichte in ppi	Bildschirmauflösung in Pixel
iPad mini® (2./3.Generation)	326	2048x1536
iPad® (3./4. Generation), iPad Air® (1./2. Generation)	264	2018x1536

Touchscreen

Ein Touchscreen ist ein kombiniertes Ein- und Ausgabegerät, bei dem durch Berührung von Teilen eines Bildes der Programmablauf eines technischen Gerätes direkt gesteuert werden kann. Die technische Umsetzung der Befehlseingabe ist für den Nutzer gleichsam unsichtbar und erzeugt so den Eindruck einer unmittelbaren Steuerung des Computers oder Tablet-PCs per Fingerzeig. Statt einen Mauszeiger mit der Maus oder Ähnlichem zu steuern, kann der Finger oder ein Zeigestift verwendet werden. Die Analogie zum Mausklick ist ein kurzes Tippen. Durch Ziehen des Fingers oder Stiftes über den Touchscreen kann eine „Ziehen und Fallenlassen“-Operation ausgeführt werden. Die iPads® können mehrere gleichzeitige Berührungen zu Befehlen verarbeiten (Multi-Touch), um zum Beispiel angezeigte Elemente zu drehen oder zu skalieren. Der Begriff „Multi-Touch“ wird meistens auch im Zusammenhang

benutzt mit der Fähigkeit des Systems, Gesten zu erkennen, z. B. „Wischen“, um eine Seite umzublättern.

Andere Systeme erlauben, z. B. durch die berührungslose Erkennung eines darüber schwebenden Fingers, die volle Emulation eines Mauszeigers mit einem vom Tippen verschiedenen reinen Zeigemodus.

Es gibt mehrere Funktionsprinzipien zur Umsetzung der Berührungsempfindlichkeit: resistive Systeme, oberflächen-kapazitive Systeme, projiziert-kapazitive Systeme, induktive Systeme, SAW (Surface Acoustic Wave), d. h. „(schall)wellen-gesteuerte Systeme“, optische Systeme (in der Regel Infrarotlicht-Gitter vor dem Monitor), Dispersive-Signal-Technology-Systeme.

Der projiziert-kapazitive Touchscreen bei iPads verwendete Variante. Dieser projiziert-kapazitive Touchscreen (meist „PCT“ = „Projected Capacitive Touch“ oder „PCAP“ abgekürzt) nutzt zwei Ebenen mit einem leitfähigen Muster (meistens Streifen oder Rauten). Die Ebenen sind voneinander isoliert angebracht. Eine Ebene dient als Sensor, die andere übernimmt die Aufgabe des Treibers. Befindet sich ein Finger am Kreuzungspunkt zweier Streifen, so ändert sich die Kapazität des Kondensators, und es kommt ein stärkeres Signal am Empfängerstreifen an. Der wesentliche Vorteil dieses Systems ist, dass der Sensor auf der Rückseite des Deckglases angebracht werden kann. So erfolgt die Bedienung auf der praktisch verschleißfreien Glasoberfläche. Ferner ist die Erkennung von Gesten und mehreren Berührungen (also Multi-Touch) möglich. Kapazitive Touchscreens können nur mit dem bloßen Finger, leitfähigen Eingabestiften oder speziell angefertigten Hilfsmitteln, nicht aber mit einem herkömmlichen Eingabestift oder dicken Handschuhen bedient werden (Wikipedia, 2015f) (Abb. 28).

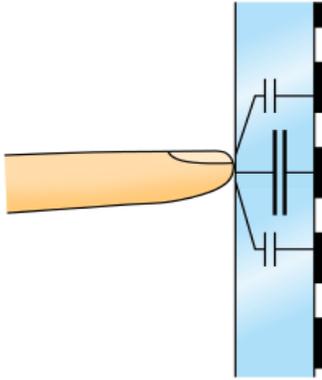


Abb. 28: Projiziert-kapazitiver Touchscreen

Farbmanagement

Hinsichtlich des Farbmanagements bietet das iPad® grundsätzlich keine Kalibrierungsmöglichkeiten und, abgesehen von der Helligkeit, auch keine hardwareseitige Möglichkeit der Bildeinstellung. Daher kann eine verlässliche Farbverbindlichkeit kaum möglich sein. Ein Vergleich zwischen mehreren Geräten lässt erhebliche Unterschiede in der Farbtemperatur der Bildschirme erkennen. Ein Layout oder Bild auf unterschiedlichen Geräten kann daher in einem Fall bläulich, im anderen gelblich oder zu rot erscheinen.

Das Betriebssystem iOS verfügt über kein zentrales CMS (colormanagement-system), wie dies bei den Mac-Computern in Form von ColorSync beispielsweise der Fall ist.

Außerdem zeigt sich bei der Vermessung des iPads®, dass dessen Farbraum kleiner als der sRGB-Farbraum ist. Demzufolge können viele Farben auf dem Gerät nicht dargestellt werden, und gerade die Grauachse begrenzt die Möglichkeiten von Zeichnung in hellen und dunklen Bereichen (Benkert, 2012) (Abb. 29).

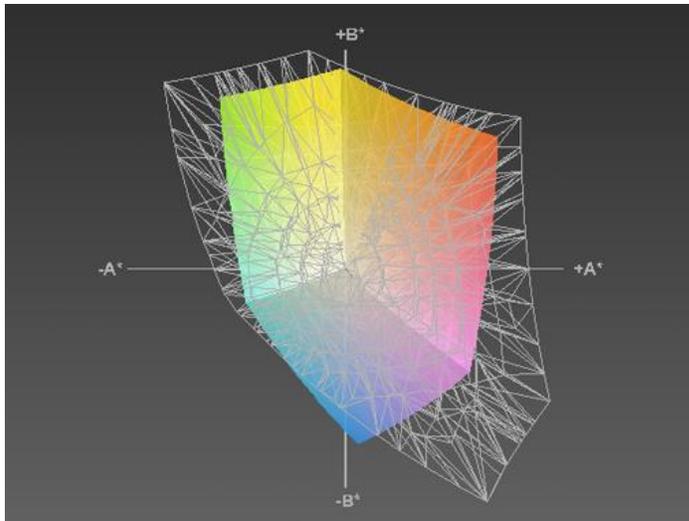


Abb. 29: iPad®-Farbraum vs. sRGB-Farbraum (Grid)

Im September 2008 wurden das Betriebssystem und die Software-Plattform Android (Fa. Google) für mobile Geräte wie Smartphones, Mobiltelefone, Mediaplayer, Netbooks und Tablet-Computer entwickelt (Wikipedia, 2015a). Viele Smartphones und Tablet-PCs wie Kindle Fire (modifiziertes Android) und die Geräte der Firmen LG, HTC, Samsung, Sony, Motorola, Nexus und vieler anderer verfügen über die Android-Software (Diffen, 2015). Es sind verschiedene Displays mit unterschiedlichem Umfang der Darstellung des Farbraumes verfügbar. Den darstellbaren Farbraum verschiedener Tablet-PCs zeigt Abb. 30.

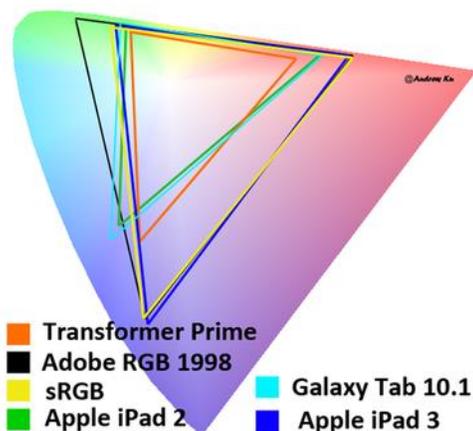


Abb. 30: Farbraumdarstellung von verschiedenen Tablet-PCs (M.Wellendorf, 2012)

3 Methodik

3.1 Probandenrekrutierung

Die Rekrutierung von Probanden erfolgte durch gezielte Informationen im Internet (E-Mail-Verteiler der Helios Klinik Berlin Buch und das lokale Kleinanzeigenportal: das Schwarze Brett) sowie in den lokalen Printmedien („Bucher Bote“). Die Untersuchungen erfolgten unter standardisierten Arbeitsbedingungen im Zeitraum von Mai 2012 bis Dezember 2013.

Es wurden insgesamt 77 freiwillige Probanden untersucht. 62 davon waren normalsichtig und 15 hatten eine Farbsehstörung. Zudem erfolgte bei 10 Probanden ein Vergleich zwischen iPad1® und iPad2®.

Es wurden keine Patienten eingeschlossen und die Untersuchungen waren nicht mit Belastungen oder Risiken für die Probanden verbunden. Die Probanden wurden umfassend über Ziele und Verfahren der Untersuchung aufgeklärt.

3.2 Verwendete Farbtafeln und verwendetes Anomaloskop

Es sind 19 Pigmentfarbtafeln nach Velhagen, Broschmann und Kuchenbecker und die gleichen Tafeln in digitaler Form mittels Tablet-PC verglichen worden. Es wurden die Farbtafeln nach Velhagen, Broschmann und Kuchenbecker „Tafeln zur Prüfung des Farbsehens“ in der 34. Auflage (2011) verwendet (s. Anhang 1) (Abb. 31, Tab. 3).



Abb. 31: Tafeln zur Prüfung des Farbsehens, 34. Auflage (2011)

Tab. 3: Verwendete Farbtafeln

Tafel-Nr.	Antwort Farbnormaler	Antwort Farbfehlsichtiger	Beschreibung
1	2L	2L	Demonstrationstafel
2	182	Rot-Grün-Störung: 8 Blau-Gelb-Störung: 12	diagnostische Tafel
3	69	Rot-Grün-Störung: 60, 66, 00	Tafel mit alternativem Sehzeichen
4	H5	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
5	3	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
6	6R	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
7	2	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
8	F4	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
9	6	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
10	51	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
11	3	Rot-Grün-Störung: 8	Tafel mit alternativem Sehzeichen
12	CH	Rot-Grün-Störung: 31 oder 37	Tafel mit alternativem Sehzeichen
13	42	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
14	49	Blau-Gelb-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
15	5E	Blau-Gelb-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
16	65	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
17	RG	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
18	A4	Rot-Grün-Störung: keine oder falsche Antwort	Tafel mit verschwindenden Sehzeichen
19	B5	Rot-Grün-Störung: B6	Tafel mit alternativem Sehzeichen

Als Anomaloskop wurde das Heidelberger Multi-Color-Anomaloskop der Fa. Oculus verwendet (Abb. 32).



Abb. 32: Verwendetes HMC-Anomaloskop

3.3 Durchführung der Tests

Es wurden die Ergebnisse der Farbsehtestung mittels Pigmentfarbtafeln und Tablet-PC (iPad2®) in einer prospektiven, randomisierten Studie miteinander verglichen. Dabei wurde immer nur das rechte Auge geprüft. Zunächst erfolgte sine bzw. cum correctione eine Visusprüfung für die Nähe. An geraden Tagen erfolgte zunächst die Untersuchung mit dem Buch, danach die mit dem Tablet-PC, und an ungeraden Tagen wurde die Reihenfolge umgekehrt. Die Untersuchung erfolgte unter standardisierten Bedingungen. Die Untersuchung mit dem Buch wurde unter Verwendung einer Tageslichtlampe mit standardisierter Beleuchtung von 6500 K und einer Beleuchtungsstärke 800 lux durchgeführt. Die Untersuchung mit dem Tablet-PC wurde bei einer Einstellung des Displays auf maximale Helligkeit durchgeführt. Der Untersuchungsabstand betrug 70 cm. Anschließend erfolgte die Untersuchung mit dem HMC-Anomaloskop der Firma Oculus. Es wurde die Rayleigh-Gleichung verwendet. Dabei wurde der Anomalquotient bestimmt (Abb. 33, Abb. 34).



Abb. 33: Untersuchungsplatz

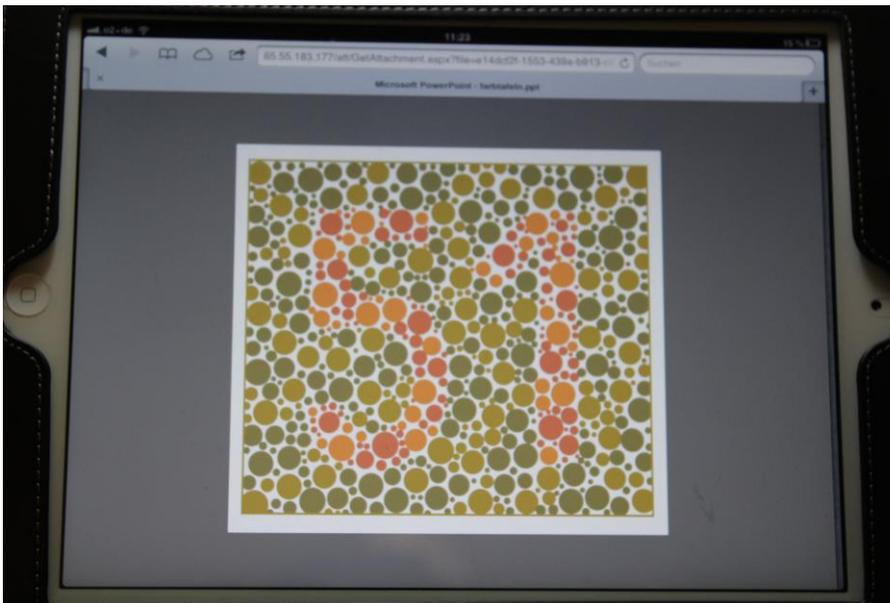


Abb. 34: Verwendetes iPad2® mit Darstellung einer Farbtafel

Wenn es bei der Untersuchung mit dem Anomaloskop zu dem Ergebnis „Diagnose nicht möglich“ kam, erfolgte eine Untersuchung mit den pseudoisochromatischen Ishihara-Farbtafeln Nummer 15 und 17 der Auflage von 1979. Damit konnte eine Deuteranomalie bzw. eine Deuteranopie von einer

Protanomalie bzw. Protanopie differenziert werden. Die Tafel 15 wurde bereits in der Abbildung 22 dargestellt, hier wird die Tafel 17 gezeigt (Abb. 35).

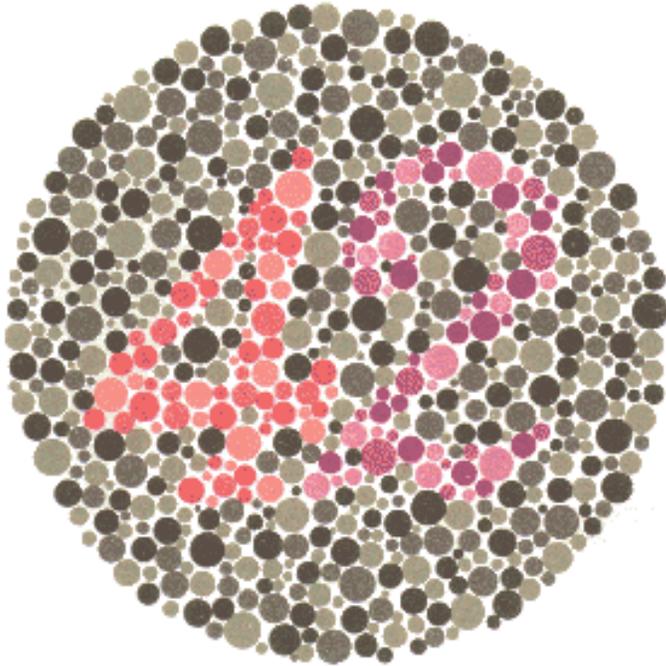


Abb. 35: Ishihara-Farbtafel 17 (Antwort 4: Deuteranomalie, Antwort 2: Protanomalie)

Außerdem wurden zehn Probanden (ein Proband mit Farbsehstörung und neun Probanden ohne Farbsehstörung) mit dem iPad1® untersucht.

3.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe der Software „SPSS“ (Version 13, SPSS Inc., Illinois, USA).

Es wurde für jede Tafel geprüft, ob zwischen den Angaben „Buch“ vs. „iPad2®“ bzw. „iPad1®“ Übereinstimmung bestand. Auch die Angabe „ng“ (nicht gelesen) in beiden Fällen wurde als Übereinstimmung gewertet.

Die Konfidenzintervalle wurden nach der Wilson-Score-Methode berechnet.

Zunächst wurde das iPad2® mit dem Buch bei allen Probanden verglichen.

Dann wurde das iPad1® mit dem iPad2® und das iPad1® mit dem Buch verglichen.

Anschließend erfolgte ein Vergleich zwischen den drei Gruppen: Buch vs. iPad1®, Buch vs. iPad2®, iPad1® vs. iPad2®. Die Übereinstimmung zwischen den drei Gruppen wurde nach Landis und Koch eingeteilt (Landis et al., 1977).

4 Ergebnisse der statistischen Auswertung

4.1 Alters- und Geschlechtsverteilung

Das Durchschnittsalter aller Probanden betrug $42,81 \pm 16,95$ Jahre (Abb. 36). Es wurden insgesamt 77 Probanden, davon 35 Männer und 42 Frauen untersucht. Von den Männern hatten 15 eine Farbsehstörung und 20 keine Farbsehstörung. Bei den Frauen wurde keine Farbsehstörung festgestellt. Die Signifikanz wurde mittels des Zweistichproben-t-Tests (Welch-Test oder t-Test nach Satterthwaite) berechnet. Der p-Wert für die Altersverteilung zwischen Farbnormalen und Farbfehlsichtigen betrug 0,14 ($p > 0,1$), sodass kein signifikanter Unterschied bestand.

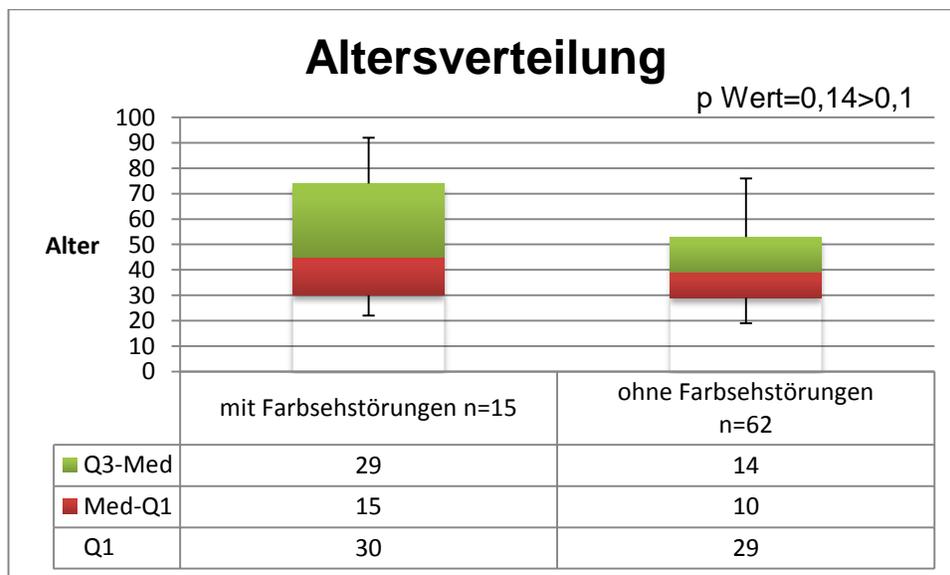


Abb. 36: Darstellung der Altersverteilung der Probanden mit und ohne Farbsehstörung (Minimum=22, Q1=30, Median=45, Q3=74, Maximum=92 bei den Farbfehlsichtigen, Minimum=19, Q1=29, Median=39, Q3=53, Maximum=76 bei den Farbnormalen)

4.2 Visusergebnisse

Der mittlere Nahvisus betrug insgesamt $0,99 \pm 0,15$ für alle Probanden (Abb. 37). Der p-Wert für den Nahvisus der Farbnormalen und der Farbfehlsichtigen betrug 0,41 ($p > 0,1$), sodass kein signifikanter Unterschied bestand.

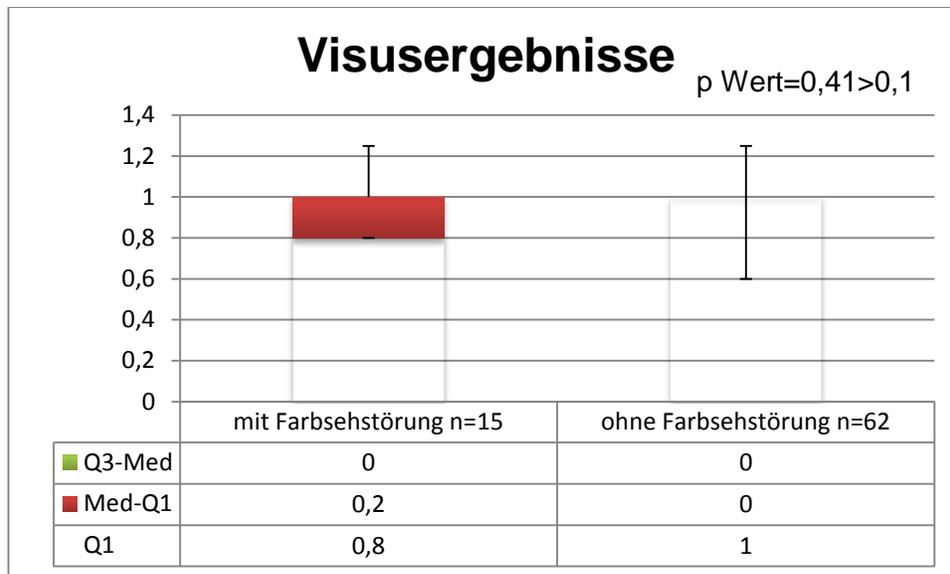


Abb. 37: Darstellung der Visusverteilung der Probanden mit und ohne Farbsehstörung (Minimum=0,8, Q1=0,8, Median=1, Q3=1, Maximum=1,25 bei den Farbfehlsichtigen, Minimum=0,6, Q1=1, Median=1, Q3=1, Maximum=1,25 bei den Farbnormalen)

4.3 Verteilung der Farbsehstörungen

Von den 77 Probanden hatten 15 eine angeborene Farbsehstörung. Diese Probanden waren alle männlich. 8 Probanden hatten eine Deuteranomalie, 5 eine Deuteranopie und 2 eine Protanomalie.

4.4 Verteilung der Fehler

Es folgt die Darstellung der Anzahl der Fehler bei den Probanden mit und ohne Farbsehstörung bei der Untersuchung des Farbsehens mittels Buch (Abb. 38) und iPad2® (Abb. 39).

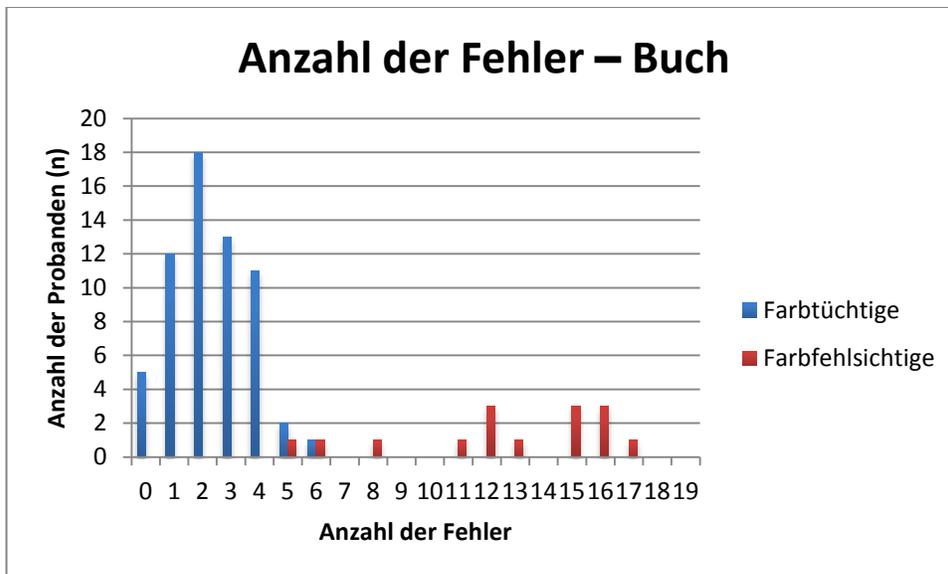


Abb. 38: Darstellung der Anzahl der Fehler pro Tafel bei der Untersuchung des Farbsehens mittels Buch bei den Probanden mit Farbsehstörung (rot) und ohne Farbsehstörung (blau), n = Anzahl der Probanden

Es zeigt sich, dass ein Proband der Gruppe der Farbtüchtigen 6 Fehler aufwies und ein Proband der Gruppe der Farbfehlsichtigen 5 Fehler hatte.

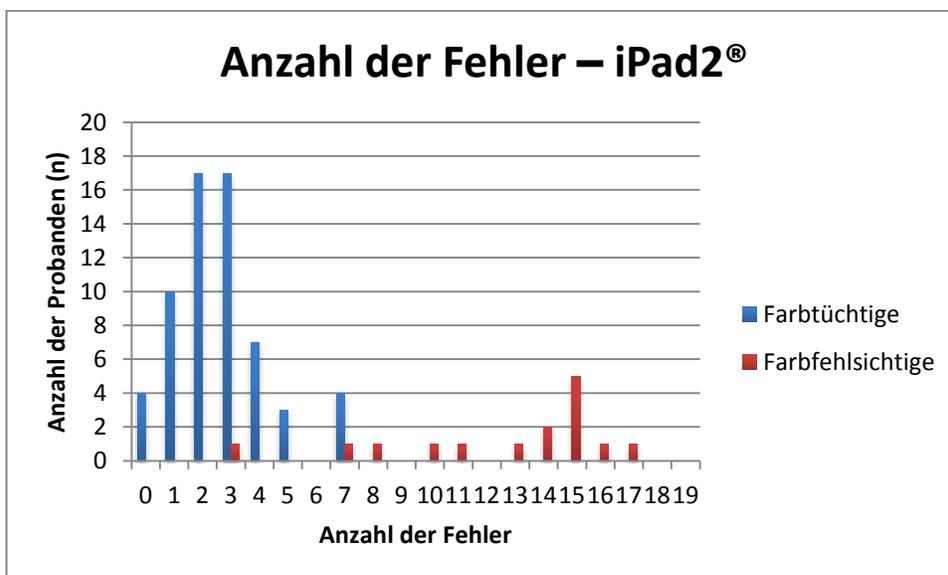


Abb. 39: Darstellung der Anzahl der Fehler pro Tafel bei der Untersuchung des Farbsehens mittels iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörung (rot) und ohne Farbsehstörung (blau), n = Anzahl der Probanden

Es zeigt sich hier, dass ein Proband der Gruppe der Farbtüchtigen 7 Fehler hatte, während ein Proband der Gruppe der Farbfehlsichtigen nur 3 Fehler

aufwies. Die Trennschärfe des iPad2® ist damit etwas geringer als die des Buches.

4.5 Vergleich des Farbsehens anhand verschiedener Medien

4.5.1 Vergleich des Farbsehens mittels Buch und iPad2® bei allen Probanden

Die Übereinstimmung beim Vergleich der 19 Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Farbtafeln zwischen Buch und iPad2® bei allen Nutzern betrug 88% (Tab. 4). Das 95%-Konfidenzintervall reicht von 81,6 bis 89,6%.

Tab. 4: Vergleich des Farbsehens zwischen Buch und iPad2® bei allen Probanden

	Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
keine Übereinstimmung	167	12,0	12,0	12,0
Gültig Übereinstimmung (Buch=iPad2®)	1219	88,0	88,0	100,0
Gesamt	1386	100,0	100,0	

Die höchste Übereinstimmung besteht mit 100% bei der Tafel 14 (Zeichen: 49). Die geringste Übereinstimmung besteht mit 55,8% bei der Tafel 4 (Zeichen: H5) (Tab. 5).

Tab. 5: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel zwischen Buch und iPad2® bei allen Nutzern

	Keine Übereinstimmung	(%)	Übereinstimmung	(%)	Gesamt	95%- Konfidenzintervall	
	2	12	15,6%	65	84,4%	77	[74,7%, 90,9%]
	3	2	2,6%	75	97,4%	77	[91,0%, 99,3%]
	4	34	44,2%	43	55,8%	77	[44,7%, 66,4%]
	5	1	1,3%	76	98,7%	77	[93,0%, 99,8%]
	6	8	10,4%	69	89,6%	77	[80,8%, 94,6%]
	7	3	3,9%	74	96,1%	77	[89,2%, 98,7%]
	8	3	3,9%	74	96,1%	77	[89,2%, 98,7%]
	9	15	19,5%	62	80,5%	77	[70,3%, 87,8%]
	10	2	2,6%	75	97,4%	77	[91,0%, 99,3%]
Tafel	11	5	6,5%	72	93,5%	77	[85,7%, 97,2%]
	12	27	35,1%	50	64,9%	77	[53,8%, 74,7%]
	13	3	3,9%	74	96,1%	77	[89,2%, 98,7%]
	14	0	0,0%	77	100,0%	77	[95,2%, 100,0%]
	15	4	5,2%	73	94,8%	77	[87,4%, 98,0%]
	16	10	13,0%	67	87,0%	77	[77,7%, 92,8%]
	17	3	3,9%	74	96,1%	77	[89,2%, 98,7%]
	18	6	7,8%	71	92,2%	77	[84,0%, 96,4%]
	19	29	37,7%	48	62,3%	77	[51,2%, 72,3%]

4.5.2 Vergleich des Farbsehens mittels Buch und iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörung

Die Übereinstimmung beim Vergleich der 19 Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Farbtafeln zwischen Buch und iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörungen betrug 83,3% (Tab. 6). Das 95%-Konfidenzintervall reicht von 78,4 bis 87,3%.

Tab. 6: Vergleich des Farbsehens mittels Buch und iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörung

	Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
keine Übereinstimmung	45	16,7	16,7	16,7
Gültig Übereinstimmung (Buch = iPad2®)	225	83,3	83,3	100,0
Gesamt	270	100,0	100,0	

Die höchste Übereinstimmung besteht mit 100% bei Tafel 2 (Zeichen: 182), Tafel 5 (Zeichen: 3), Tafel 14 (Zeichen: 49) und Tafel 15 (Zeichen: 5E). Die geringste Übereinstimmung besteht mit 53,3% bei der Tafel 9 (Zeichen: 6) (Tab. 7).

Tab. 7: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel mittels Buch und iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörungen

	Keine Übereinstimmung	(%)	Übereinstimmung	(%)	Gesamt	95%- Konfidenzintervall
2	0	0,0%	15	100,0%	15	[79,6%, 100,0%]
3	2	13,3%	13	86,7%	15	[62,1%, 96,3%]
4	4	26,7%	11	73,3%	15	[48,0%, 89,1%]
5	0	0,0%	15	100,0%	15	[79,6%, 100,0%]
6	4	26,7%	11	73,3%	15	[48,0%, 89,1%]
7	2	13,3%	13	86,7%	15	[62,1%, 96,3%]
8	2	13,3%	13	86,7%	15	[62,1%, 96,3%]
9	7	46,7%	8	53,3%	15	[30,1%, 75,2%]
10	2	13,3%	13	86,7%	15	[62,1%, 96,3%]
Tafel 11	2	13,3%	13	86,7%	15	[62,1%, 96,3%]
12	5	33,3%	10	66,7%	15	[41,7%, 84,8%]
13	3	20,0%	12	80,0%	15	[54,8%, 93,0%]
14	0	0,0%	15	100,0%	15	[79,6%, 100,0%]
15	0	0,0%	15	100,0%	15	[79,6%, 100,0%]
16	2	13,3%	13	86,7%	15	[62,1%, 96,3%]
17	2	13,3%	13	86,7%	15	[89,2%, 98,7%]
18	5	33,3%	10	66,7%	15	[41,7%, 84,8%]
19	3	20,0%	12	80,0%	15	[54,8%, 93,0%]

4.5.3 Vergleich des Farbsehens zwischen Buch und iPad2® bei den Probanden ohne Farbsehstörung

Die Übereinstimmung beim Vergleich der 19 Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Farbtafeln mittels Buch und iPad2® bei den Probanden ohne Farbsehstörungen betrug 89,1% (Tab. 8). Das 95%-Konfidenzintervall reicht von 87,1 bis 90,8%.

Tab. 8: Vergleich der Untersuchung des Farbsehens zwischen Buch und iPad2® bei den Probanden ohne Farbsehstörungen

	Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
keine Übereinstimmung	122	10,9	10,9	10,9
Gültig Übereinstimmung (Buch=iPad2®)	994	89,1	89,1	100,0
Gesamt	1116	100,0	100,0	

Die höchste Übereinstimmung besteht mit 100% bei Tafel 3 (Zeichen: 69), Tafel 10 (Zeichen: 51), Tafel 13 (Zeichen: 42) und Tafel 14 (Zeichen: 49). Die geringste Übereinstimmung besteht mit 51,6% bei der Tafel 4 (Zeichen: H5) und mit 58,1% bei Tafel 19 (Zeichen: B5) (Tab. 9).

Tab. 9: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel mittels Buch und iPad2® bei den Probanden ohne Farbsehstörungen

	Keine Übereinstimmung	(%)	Übereinstimmung	(%)	Gesamt	95%- Konfidenzintervall	
	2	12	19,4%	50	80,6%	62	[69,1%, 88,6%]
	3	0	0,0%	62	100,0%	62	[94,2%, 100,0%]
	4	30	48,4%	32	51,6%	62	[39,4%, 63,6%]
	5	1	1,6%	61	98,4%	62	[91,4%, 99,7%]
	6	4	6,5%	58	93,5%	62	[84,6%, 97,5%]
	7	1	1,6%	61	98,4%	62	[91,4%, 99,7%]
	8	1	1,6%	61	98,4%	62	[91,4%, 99,7%]
	9	8	12,9%	54	87,1%	62	[76,6%, 93,3%]
	10	0	0,0%	62	100,0%	62	[94,2%, 100,0%]
Tafel	11	3	4,8%	59	95,2%	62	[86,7%, 98,3%]
	12	22	35,5%	40	64,5%	62	[52,1%, 75,3%]
	13	0	0,0%	62	100,0%	62	[94,2%, 100,0%]
	14	0	0,0%	62	100,0%	62	[94,2%, 100,0%]
	15	4	6,5%	58	93,5%	62	[84,6%, 97,5%]
	16	8	12,9%	54	87,1%	62	[76,6%, 93,3%]
	17	1	1,6%	61	98,4%	62	[91,4%, 99,7%]
	18	1	1,6%	61	98,4%	62	[91,4%, 99,7%]
	19	26	41,9%	36	58,1%	62	[45,7%, 69,5%]

4.5.4 Vergleich des Farbsehens mittels iPad1® und iPad2® bei allen Probanden

Die Übereinstimmung beim Vergleich der 19 Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Farbtafeln zwischen iPad1® und iPad2® bei allen Probanden betrug 87,2% (Tab. 10). Das 95%-Konfidenzintervall reicht von 81,6 bis 91,3%.

Tab. 10: Vergleich der Untersuchung des Farbsehens mittels iPad1® und iPad2® bei allen Probanden

	Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
keine Übereinstimmung	23	12,8	12,8	12,8
Gültig Übereinstimmung (iPad1®=iPad2®)	157	87,2	87,2	100,0
Gesamt	180	100,0	100,0	

Bei den meisten Tafeln besteht eine Übereinstimmung von 90%-100%. Die geringste Übereinstimmung besteht mit 30% bei der Tafel 4 (Zeichen: H5), mit 50% bei der Tafel 19 (Zeichen: B5) und mit 60% bei Tafel 2 (Zeichen: 182) und Tafel 12 (Zeichen: CH) (Tab. 11).

Tab. 11: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel mittels iPad1® und iPad2® bei allen Nutzern

	Keine Übereinstimmung	(%)	Übereinstimmung	(%)	Gesamt	95%- Konfidenzintervall	
	2	4	40,0%	6	60,0%	10	[31,3%, 83,2%]
	3	1	10,0%	9	90,0%	10	[59,6%, 98,2%]
	4	7	70,0%	3	30,0%	10	[10,8%, 60,3%]
	5	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	6	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	7	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	8	1	10,0%	9	90,0%	10	[59,6%, 98,2%]
	9	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	10	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
Tafel	11	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	12	4	40,0%	6	60,0%	10	[31,3%, 83,2%]
	13	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	14	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	15	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	16	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	17	1	10,0%	9	90,0%	10	[59,6%, 98,2%]
	18	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,2%, 100,0%]
	19	5	50,0%	5	50,0%	10	[16,8%, 68,7%]

4.5.5 Vergleich bei der Untersuchung des Farbsehens zwischen Buch und iPad1® bei allen Probanden

Die Übereinstimmung beim Vergleich der 19 Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Farbtafeln zwischen Buch und iPad1® bei allen 10 Probanden, die mittels iPad1® untersucht wurden, betrug 84,4% (Tab. 12). Das 95%-Konfidenzintervall reicht von 78,4 bis 89,0%.

Tab. 12: Vergleich des Farbsehens zwischen Buch und iPad1® bei allen 10 Probanden, die mittels iPad1® untersucht wurden

	Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
keine Übereinstimmung	28	15,6	15,6	15,6
Gültig Übereinstimmung (Buch=iPad1®)	152	84,4	84,4	100,0
Gesamt	180	100,0	100,0	

Bei den meisten Tafeln besteht eine Übereinstimmung von 90%-100%. Die geringste Übereinstimmung besteht mit 10% bei der Tafel 4 (Zeichen: H5), mit 40% bei der Tafel 19 (Zeichen: B5) und mit 60% bei Tafel 2 (Zeichen: 182) und Tafel 12 (Zeichen: CH) (Tab. 13).

Tab. 13: Auswertung der Ergebnisse pro Tafel mittels Buch und iPad1® bei allen Nutzern, die mittels iPad1® untersucht wurden

	Keine Übereinstimmung	(%)	Übereinstimmung	(%)	Gesamt	95%- Konfidenzintervall	
	2	4	40,0%	6	60,0%	10	[31,3%, 83,2%]
	3	1	10,0%	9	90,0%	10	[59,6%, 98,2%]
	4	9	90,0%	1	10,0%	10	[1,8%, 40,4%]
	5	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,7%, 100,0%]
	6	1	10,0%	9	90,0%	10	[59,6%, 98,2%]
	7	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,7%, 100,0%]
	8	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,7%, 100,0%]
	9	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,7%, 100,0%]
	10	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,7%, 100,0%]
Tafel	11	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,7%, 100,0%]
	12	4	40,0%	6	60,0%	10	[31,3%, 83,2%]
	13	1	10,0%	9	90,0%	10	[59,6%, 98,2%]
	14	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,7%, 100,0%]
	15	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,7%, 100,0%]
	16	1	10,0%	9	90,0%	10	[59,6%, 98,2%]
	17	1	10,0%	9	90,0%	10	[59,6%, 98,2%]
	18	0	0,0%	10	100,0%	10	[72,7%, 100,0%]
	19	6	60,0%	4	40,0%	10	[16,8%, 68,7%]

4.5.6 Vergleich bei der Untersuchung des Farbsehens zwischen den drei Gruppen (Buch vs. iPad1®, Buch vs. iPad2®, iPad1® vs. iPad2®)

Wenn man einen Gesamtvergleich zwischen den drei Gruppen (Buch vs. iPad1®, Buch vs. iPad2®, iPad1® vs. iPad2®) anstellt, so zeigen sich folgende Übereinstimmungen:

- Buch vs. iPad2®: $1219/1386 = 88,0\%$

- Buch vs. iPad1®: $152/180 = 84,4\%$

- iPad1® vs. iPad2®: $157/180 = 87,2\%$

Der p-Wert nach Fisher-Freeman-Haltons exaktem Kontingenztafeltest beträgt 0,375. Also zeigen sich zwischen den drei Gruppen keine signifikanten Unterschiede.

Die Übereinstimmung zwischen den Tafeln bei den drei Gruppen nach Landis und Koch wird nach Bestimmung des Cohen´s Kappa Wertes (κ) (s. Anhang 3) in der Tabelle 14 als Übersicht dargestellt (Landis et al., 1977).

Tab. 14: Übereinstimmung nach Landis und Koch zwischen den drei Gruppen (Buch vs. iPad2®, Buch vs. iPad1®, iPad1® vs. iPad2®), $\kappa < 0$ = „schlechte Übereinstimmung“, $0 < \kappa < 0,2$ = „etwas Übereinstimmung“, $0,21 < \kappa < 0,40$ = „ausreichende Übereinstimmung“, $0,41 < \kappa < 0,60$ = „mittelmäßige (moderate) Übereinstimmung“, $0,61 < \kappa < 0,80$ = „beachtliche Übereinstimmung“, $0,81 < \kappa < 1,00$ = „vollkommene Übereinstimmung“, n.b.= nicht berechenbar

Tafel	Buch vs. iPad2®			Buch vs. iPad1®	iPad1® vs. iPad2®
	Alle	Farbfehlsichtige	Farbnormale	Alle	Alle
2	b	v	b	v	e
3	v	v	n.b.	m	n.b.
4	m	a	m	a	a
5	v	v	v	v	e
6	b	m	m	b	v
7	v	b	v	v	e
8	v	b	n.b.	b	b
9	b	e	b	v	e
10	v	b	n.b.	v	v
11	v	m	v	v	e
12	m	m	a	m	n.b.
13	b	b	n.b.	n.b.	n.b.
14	v	v	n.b.	n.b.	n.b.
15	m	n.b.	a	v	v
16	b	n.b.	e	b	b
17	v	b	b	v	b
18	b	a	b	v	v
19	m	b	m	m	a

5 Diskussion

5.1 Probanden

Insgesamt wurden 77 Probanden untersucht. Die Anzahl der Probanden kann möglicherweise die Aussagekraft der Ergebnisse beeinflussen. Von unseren Probanden hatten 15 männliche Probanden eine angeborene Farbsehstörung. Die hohe Anzahl (ca. 20%) an Probanden mit Farbsehstörungen ist darauf zurückzuführen, dass diese Probanden gezielt ausgesucht wurden. Ansonsten wären nur 8% der Probanden mit Farbsehstörungen zu erwarten (Birch, 2012; Deeb et al., 1993; Krastel, 1995).

Im Rahmen dieser Studie wurde bei keinem Probanden eine Blau-Gelb-Störung nachgewiesen. Dies liegt daran, dass angeborene Tritanen mit einer Häufigkeit von 1:10000 bis 1:60000 sehr selten sind (Kalmus, 1955a).

Außerdem wurden keine Patienten mit erworbenen Farbsehstörungen untersucht. Bei dem niedrigen Durchschnittsalter von $42,81 \pm 16,95$ Jahre ist keine erworbene Erkrankung zu erwarten. Bei den älteren Probanden ist keine Funduskopie z. A. einer Makuladegeneration bzw. Optikusatrophie durchgeführt worden. Diese sind aber bei den sehr guten Nahvisusergebnissen eher unwahrscheinlich.

5.2 Bewertung der Tafeln

Tafel 1: Zeichen 2L

Diese Demonstrationstafel wurde stets von allen Probanden sowohl mittels Buch als auch mittels iPad® erkannt.

Tafel 2: Zeichen 182

Diese diagnostische Tafel wurde sowohl bei den Farbnormalen als auch bei den Farbfehlsichtigen bei der Untersuchung des Farbsehens mittels Buch, iPad1® und iPad2® oft falsch erkannt. Die möglichen Angaben waren 8, 132 oder 82.

Bei den Probanden mit Farbsehstörung wurde hauptsächlich nur die Zahl 8 erkannt, was für eine Rot-Grün-Störung sprechen könnte. Die Übereinstimmung bei allen Probanden zwischen Buch und iPad1® sowie zwischen iPad1® und iPad2® war geringer als zwischen Buch und iPad2®, was auf eine schlechte Farbdarstellung bei iPad1® zurückzuführen sein könnte.

Tafel 3: Zeichen 69

Bei dieser Tafel mit alternativem Sehzeichen zur Detektion einer Rot-Grün-Störung zeigte sich bei der Untersuchung des Farbsehens mittels Buch und iPad2® eine gute Übereinstimmung. Zwischen Buch und iPad1® zeigte sich eine moderate Übereinstimmung, was möglicherweise auf die unterschiedliche Farbraumdarstellung zwischen den verschiedenen Tablet-PC-Modellen zurückzuführen ist.

Tafel 4: Zeichen H5

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zur Detektion einer Rot-Grün-Störung wurde bei allen Probanden, den Farbnormalen und den Farbfehlsichtigen, bei der Untersuchung der Farbsehens mittels Buch, iPad1® und iPad2® häufig falsch erkannt, sodass diese Tafel als nicht gut geeignet für die Untersuchung des Farbsehens, weder mittels Buch, noch mittels iPad®, anzusehen ist. Häufige falsche Angaben waren N5, HS, NS, X5, X.

Tafel 5: Zeichen 3

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zur Feststellung einer Rot-Grün-Störung wurde immer richtig in allen Gruppen der Farbnormalen erkannt. Bei den Farbfehlsichtigen wurde eine hohe Übereinstimmung zwischen Buch und iPad2® erzielt, sodass diese Tafel als geeignet für die Untersuchung mittels Tablet-PC anzusehen ist. Zwischen iPad1® und iPad2® zeigte sich eine schlechte Übereinstimmung, was wahrscheinlich an der unterschiedlichen Farbdarstellung der verschiedenen iPad-Modelle liegt.

Tafel 6: Zeichen 6R

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zur Detektion einer Rot-Grün-Störung zeigte sich zwischen Buch und iPad2® bei allen Probanden eine geringe Übereinstimmung, was wahrscheinlich auf technische Limitationen der Farbdarstellung zurückzuführen ist.

Tafel 7: Zeichen 2

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zur Detektion einer Rot-Grün-Störung zeigte bei den Farbfehlsichtigen zwischen Buch und iPad2® eine etwas geringere Übereinstimmung, was auf technische Limitationen der Farbdarstellung zurückzuführen sein könnte. Es zeigte sich auch eine deutlich geringe Übereinstimmung zwischen iPad1® und iPad2®. Dies könnte durch die unterschiedliche Farbdarstellung zwischen diesen iPad-Versionen bedingt sein.

Tafel 8: Zeichen F4

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zur Detektion einer Rot-Grün-Störung zeigte in allen Gruppen eine hohe Übereinstimmung. Diese Tafel ist daher als eine geeignete Tafel für die Untersuchung des Farbsehens auch mittels Tablet-PC anzusehen.

Tafel 9: Zeichen 6

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zur Feststellung einer Rot-Grün-Störung zeigte bei den Farbnormalen eine relativ gute Übereinstimmung. Bei den Farbfehlsichtigen zeigte sich zwischen Buch und iPad2® eine geringere Übereinstimmung, was auf technische Limitationen der Farbdarstellung zurückzuführen sein könnte. Zudem zeigte sich hier auch eine schlechte Übereinstimmung zwischen den beiden iPad-Versionen (iPad1® vs. iPad2®).

Tafel 10: Zeichen 51

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zur Detektion einer Rot-Grün-Störung zeigte bei den Farbnormalen in allen Gruppen eine gute Übereinstimmung. Bei den Farbfehlsichtigen war die Übereinstimmung etwas geringer.

Tafel 11: Zeichen 3

Diese Tafel mit alternativen Sehzeichen zur Detektion einer Rot-Grün-Störung zeigte bei den Farbnormalen in allen Gruppen eine gute Übereinstimmung. Bei den Farbfehlsichtigen sowie zwischen iPad1® und iPad2® zeigte sich eine deutlich geringere Übereinstimmung. Dies könnte durch die technische Limitationen der Farbdarstellung des iPads® bedingt sein.

Tafel 12: Zeichen CH

Diese Tafel mit alternativen Sehzeichen zur Detektion einer Rot-Grün-Störung wurde bei allen drei Untersuchungsmethoden oft falsch erkannt und zeigte geringere Übereinstimmungen. Die möglichen Angaben waren 6H, GH, C7, OH. Man kann davon ausgehen, dass diese Tafel für die Untersuchung des Farbsehens generell nicht gut geeignet ist.

Tafel 13: Zeichen 42

Diese Tafel mit verschwindenden Zeichen zur Detektion von Rot-Grün-Störungen zeigte bei allen Gruppen eine relativ hohe Übereinstimmung. Daher ist diese Tafel als eine gut geeignete Tafel für die Untersuchung des Farbsehens mittels Tablet-PC anzusehen.

Tafel 14: Zeichen 49

Diese Tafel mit verschwindenden Zeichen dient zur Detektion einer Blau-Gelb-Störung. Diese Tafel wurde bei allen Untersuchungsmitteln ähnlich erkannt, sodass eine hohe Übereinstimmung zu verzeichnen war. Ob sie zur Detektion

einer Blau-Gelb-Störung geeignet ist, kann nicht beurteilt werden, da keine Probanden mit Blau-Gelb-Störung vorhanden waren.

Tafel 15: Zeichen 5E

Diese Tafel mit verschwindenden Zeichen zur Detektion einer Blau-Gelb-Störung wurde von den Farbnormalen in einigen Fällen falsch erkannt. Die möglichen Angaben waren 6E, 56, 52. So ist diese Blau-Gelb-Tafel der Blau-Gelb-Tafel Nr. 14 etwas unterlegen. Dies ist auf die schlechte Konstruktion der Tafel zurückzuführen, wie bei Kuchenbecker et al. angemerkt ist (Kuchenbecker, Nicklas, et al., 2010).

Tafel 16: Zeichen 65

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zur Detektion einer Rot-Grün-Störung zeigte bei den Farbnormalen zwischen Buch und iPad2® eine geringe Übereinstimmung. Bei den kleinen Gruppen (Buch vs. iPad1® und iPad1® vs. iPad2®) bestand eine relativ hohe Übereinstimmung.

Tafel 17: Zeichen RG

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zur Detektion von Rot-Grün-Störungen zeigte mit allen drei Untersuchungsmitteln bei den Farbnormalen und den Farbfehlsichtigen eine hohe Übereinstimmung, sodass sie als gut geeignet für die Untersuchung des Farbsehens mittels Tablet-PC anzusehen ist.

Tafel 18: Zeichen A4

Diese Tafel mit verschwindenden Sehzeichen zeigte bei den Farbnormalen eine relativ gute Übereinstimmung. Bei den Farbfehlsichtigen zeigte sich zwischen Buch und iPad2® eine geringere Übereinstimmung, was auf technische Limitationen der Farbdarstellung zurückzuführen sein könnte.

Tafel 19: Zeichen B5

Diese Tafel mit alternativen Zeichen zur Detektion von Rot-Grün-Störungen zeigte in allen Fällen eine schlechte Übereinstimmung, sodass sie für die Untersuchung des Farbsehens generell nicht so gut geeignet ist.

Alle Probanden

Bei der Untersuchung des Farbsehens mittels Buch und iPad2® bei allen Probanden bestand die niedrigste Übereinstimmung mit 55,8% bei der Tafel 4 (Zeichen: H5). Darauf folgt bei Tafel 19 (Zeichen: B5), Tafel 12 (Zeichen: CH), Tafel 9 (Zeichen: 6) und Tafel 2 (Zeichen: 182) die nächstniedrigere Übereinstimmung. Daher sind diese Tafeln eher als nicht gut geeignet für die Untersuchung des Farbsehens mittels Tablet-PC (iPad2®) anzusehen. Die höchste Übereinstimmung zeigte mit 100% die Blau-Gelb-Tafel 14 (Zeichen: 49). Dies ist dadurch erklärt, dass bei keinem Probanden eine Blau-Gelb-Störung vorlag.

Probanden mit Farbsehstörung

Bei der Untersuchung des Farbsehens mittels Buch und iPad2® bei den Probanden mit Farbsehstörung zeigte die Rot-Grün-Tafel 9 (Zeichen: 6) mit 53,3% die niedrigste Übereinstimmung. Die Tafeln 12 (Zeichen: CH) und 18 (Zeichen: A4), ebenfalls Tafeln zur Detektion einer Rot-Grün-Störung zeigten mit 66,7% die nächstniedrigere Übereinstimmung. Die Tafeln 4 (Zeichen: H5) und 6 (Zeichen: 6R) gelten mit einer Übereinstimmung von 73,3% auch als nicht gut geeignet für die Untersuchung mittels Tablet-PC (iPad2®). Hingegen zeigten die Tafel 2 (Zeichen: 182), Tafel 5 (Zeichen: 3), Tafel 14 (Zeichen: 49) und Tafel 15 (Zeichen: 5E) eine Übereinstimmung von 100%, sodass bei diesen Tafeln eine Untersuchung des Farbsehens mittels Buch und iPad® als gleichwertig anzusehen ist. Bei der Einordnung der Übereinstimmung nach Landis und Koch zeigt sich das iPad2® bei den Tafeln 6 (Zeichen: 6R), 9 (Zeichen: 6), 11 (Zeichen: 3) und 18 (Zeichen: A4) bei den Probanden mit Farbsehstörungen gegenüber dem Buch unterlegen.

Probanden ohne Farbsehstörung

Bei der Untersuchung des Farbsehens mittels Buch und iPad2® bei den Probanden ohne Farbsehstörungen zeigten die Tafel 4 (Zeichen: H5), die Tafel 19 (Zeichen: B5) und die Tafel 12 (Zeichen: CH) mit jeweils einem Prozentsatz von 51,6%, 58,1% und 64,5% eine niedrige Übereinstimmung. Dies ist zurückzuführen auf die Verwendung mehrdeutiger Zeichen. Andererseits bestand eine Übereinstimmung von 100% bei der Tafel 3 (Zeichen: 69), Tafel 10 (Zeichen: 51), Tafel 13 (Zeichen: 42) und Tafel 14 (Zeichen: 49).

Alle Probanden, die mittels iPad1® untersucht wurden

Bei der Untersuchung des Farbsehens bei den Probanden, welche mit dem iPad1® untersucht wurden, zeigten die Tafeln 2 (Zeichen: 182), 4 (Zeichen: H5), 12 (Zeichen: CH) und 19 (Zeichen: B5) die niedrigste Übereinstimmung zwischen Buch und iPad1® bzw. zwischen iPad1® und iPad2®, während bei den restlichen Farbtafeln eine hohe Übereinstimmung bestand.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Tafeln „182“, „H5“, „CH“ und „B5“ bei allen Gruppen, bei der Untersuchung mit dem Buch als auch bei der Untersuchung mit dem Tablet-PC (iPad1® und iPad2®), sehr oft verwechselt wurden. Somit sind diese Tafeln generell als nicht gut geeignet für die Untersuchung des Farbsehens anzusehen. Auf der anderen Seite wurden die Tafeln „69“, „3“ (Tafel Nr. 5), „2“, „F4“, „51“, „42“, „49“, „5E“ und „RG“ von allen Nutzern entsprechend ihrer Farbsehfähigkeit erkannt, sodass diese Farbtafeln für die Testung des Farbsehens mittels Tablet-PC gut geeignet sind. Das iPad2® zeigte sich bei den Probanden mit Farbsehstörung insbesondere bei den Tafeln „6R“, „6“, „3“ (Tafel Nr. 11) und „A4“ unterlegen.

5.3 Technische Limitationen

Unerlässlich ist die Durchführung des Tests unter kontrollierten Untersuchungsbedingungen, mit dem Buch bei Tageslicht und bei der Untersuchung mit dem Tablet-PC bei maximaler Helligkeit des Displays und 70

cm Abstand. Es sollte auch die jeweils beste mögliche Nahkorrektur verwendet werden. Um die Zuverlässigkeit der Testung des Farbsehens mittels Tablet-PC zu gewährleisten, sollten die Patienten immer darauf hingewiesen werden, die empfohlenen Untersuchungsbedingungen einzuhalten.

Bei der Untersuchung des Farbsehens mit pseudoisochromatischen Tafeln besteht generell das Problem der exakten Farbwiedergabe. Es sind bei verschiedenen Auflagen der Velhagen/Broschmann-Tafeln als auch bei den Ishihara-Tafeln (Adams et al., 1975) Farbunterschiede beschrieben worden, welche auf Fehler bei der Herstellung oder auf das mit der Zeit einsetzende Ausbleichen der Tafeln zurückzuführen sind (Kuchenbecker, Nicklas, et al., 2010; Kuchenbecker, Roehl, et al., 2010).

Beim Tablet-PC spielt die Farbverbindlichkeit eine große Rolle. Das iPhone® und das iPad® haben nicht das „color management system“ wie ein Apple-Computer. Außerdem weist der Apple-Computer höhere Auflösungen auf. Es bleibt festzuhalten, dass derzeit eine Farbverbindlichkeit bei den Geräten (Tablet-PCs) nicht gegeben ist. Daher sind diese hinsichtlich der Farbqualität nicht so zuverlässig.

Der sRGB-Farbraum ist größer als der des iPads®, sodass nicht alle Farben auf dem iPad® wiedergegeben werden können.

Auch bei der Untersuchung des Farbsehens mittels Tablet-PC ergeben sich Unterschiede hinsichtlich der Farbwiedergabe zwischen den verschiedenen iPad®-Versionen. Die Farbraumdarstellung ist deutlich unterschiedlich zwischen den verschiedenen Tablet-PC-Modellen. Das iPad3® kann 66,1% des Adobe-RGB-1998-Farbraums darstellen – eine Verbesserung um fast 35% gegenüber den vorherigen iPads®. Dies wurde allerdings im Rahmen unserer Studie nicht getestet. Es zeigte sich noch, dass das iPad2® hinsichtlich der Farbraumdarstellung geringfügig schlechter als das iPad1® abschneidet. Das iPad3® führt die Liste an, mit deutlichem Abstand zum nächsten Konkurrenten sowie zum iPad2®, das nur 68,9% des sRGB-Farbraums darstellt und damit

25,5% hinter dem iPad3® zurückbleibt. Daher zeigte sich, dass das iPad2® hinsichtlich des Prozentsatzes des dargestellten Adobe-RGB-1998- und sRGB-Farbraums dem iPad1® und iPad3® unterlegen ist. Das iPad3® hat außerdem große Fortschritte bei der Darstellung von dunklen Blau-, Magenta- und Rottönen gemacht. Gleiches gilt für blaue und rote Mitteltöne sowie helles Grün. Bemerkenswert ist allerdings, dass die Fähigkeiten des iPad2® bei Cyan-Schatten und Cyan-Mitteltönen größer sind (M.Wellendorf, 2012). Demzufolge kann es sein, dass die unterschiedlichen Generationen des iPads zu unterschiedlichen Ergebnissen führen könnten. Allerdings wurde in unserer Studie immer der gleiche Tablet-PC (iPad2® bzw. iPad1®) verwendet.

Ein anderes Problem ist die Vergleichbarkeit zwischen den Tablet-PCs der gleichen Generation. In unserer Studie wurden z. B. nicht zwei iPads2® verglichen. Auch hier könnten Unterschiede in der Farbdarstellung auftreten.

Um die generelle Eignung von Tablet-PCs für die Untersuchung des Farbsehens zu überprüfen, wäre auch der Vergleich zwischen Tablet-PCs mit verschiedenen Betriebssystemen, iOS und Android, möglich, da auch diese Tablet-PCs unterschiedliche Displays besitzen. Allerdings haben wir uns nur auf die Untersuchung mittels iPad1® und iPad2® beschränkt.

6 Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat die Nutzung von Tablet-PCs im täglichen Alltag stark zugenommen. Es stehen zahlreiche medizinische und ophthalmologische Applikationen zur Verfügung, die ein gutes Hilfsmittel in der klinischen Versorgung der Patienten, der Datenverarbeitung und der Kommunikation sein können. Auch für die Testung des Farbsehens gibt es verschiedene Applikationen, die jedoch bisher in Studien nicht auf ihre Tauglichkeit untersucht worden sind.

Unter kontrollierten Testbedingungen wurde daher in einem Zeitraum von Mai 2012 bis Dezember 2013 ein Farbsehtest mittels Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Tafeln unter Verwendung eines Tablet-PCs (iPad2®) durchgeführt. Dabei wurden randomisiert die Tafeln mittels Buch und mittels Tablet-PC (iPad®) präsentiert. Es wurden insgesamt 77 freiwillige Probanden mit einem Durchschnittsalter von $42,81 \pm 16,95$ Jahren und einem mittleren Nahvisus von $0,99 \pm 0,15$ untersucht. 62 Probanden waren farbnormal, und 15 Probanden wiesen eine Farbsehstörung auf. Bei 10 Probanden erfolgte zusätzlich eine Testung mittels iPad1®. Die Farbsehtestung unter Verwendung von 19 Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker-Farbtafeln ergab eine Übereinstimmung von 88% zwischen Buch und Tablet-PC (iPad2®) bei allen Probanden. Bei den Probanden mit Farbsehstörung bestand eine Übereinstimmung von 83,3% und bei den Probanden ohne Farbsehstörung eine Übereinstimmung von 89,1%. Zwischen Buch und iPad1® bestand eine Übereinstimmung von 84,4% und zwischen iPad1® und iPad2® eine Übereinstimmung von 87,2%. Der p-Wert zwischen den drei Gruppen (Buch vs. iPad1®, Buch vs. iPad2®, iPad1® vs. iPad2®) nach Fischer/Freeman/Haltons exaktem Kontingenztafeltest betrug 0,375. Daher zeigten sich zwischen den drei Gruppen keine signifikanten Unterschiede.

Nach den vorliegenden Ergebnissen kann man davon ausgehen, dass unter den durchgeführten Untersuchungsbedingungen Buch und Tablet-PC (iPad2® bzw.

iPad1®) in etwa vergleichbare Untersuchungsergebnisse liefern, wobei die Trennschärfe des Buches im Vergleich zum iPad2® besser war.

Einige Farbtafeln („182“, „H5“, „CH“ und „B5“) haben sich bei der Untersuchung des Farbsehens sowohl mittels Tablet-PC als auch mittels Buch als nicht besonders gut geeignet erwiesen, da diese Tafeln auch von den Probanden ohne Farbsehstörung oft nicht richtig erkannt wurden. Das iPad2® zeigte sich bei den Probanden mit Farbsehstörung insbesondere bei den Tafeln „6R“, „6“, „3“ (Tafel Nr. 11) und „A4“ unterlegen, was am wahrscheinlichsten auf die technischen Limitationen des Verfahrens zurückzuführen ist.

Literaturverzeichnis

- Adams, A. J., Balliet, R., & McAdams, M. (1975). Color vision: blue deficiencies in children? *Invest Ophthalmol*, 14(8), 620-625.
- Aguilera, M. (2010). Farnsworth Munsell 100 Hue test. Retrieved 2 April, 2010, from <https://colorcritical.wordpress.com/2010/04/02/farnsworth-munsell-100-hue-test/>
- Apple. (2013a). iPad 2-Technische Daten. Retrieved 18.06.2013, from https://support.apple.com/kb/SP622?viewlocale=de_DE&locale=de_DE
- Apple. (2013b). iPad-Technische Daten. Retrieved 05.08.2013, from https://support.apple.com/kb/SP580?locale=de_DE&viewlocale=de_DE
- Arden, G., Gunduz, K., & Perry, S. (1988). Color vision testing with a computer graphics system: preliminary results. *Doc Ophthalmol*, 69(2), 167-174.
- Aslam, T. M., et al. (2013). An assessment of a modern touch-screen tablet computer with reference to core physical characteristics necessary for clinical vision testing. *J R Soc Interface*, 10(84), 20130239. doi: 10.1098/rsif.2013.0239
- Atonov, D. I., & Belichenko, I. A. (1970). [Changes in the colorfield of vision in patients with arterial hypertension]. *Klin Med (Mosk)*, 48(9), 53-60.
- Awad, Z., Natt, R. S., & Pothier, D. D. (2007). Ishihara plates on your handheld computer. *Clin Otolaryngol*, 32(1), 58-59.
- Barsam, A., Bhogal, M., Morris, S., & Little, B. (2010). Anterior segment slitlamp photography using the iPhone. *J Cataract Refract Surg*, 36(7), 1240-1241. doi: 10.1016/j.jcrs.2010.04.001
- Bayer, A., et al. (1995). [Sensitive physiologic perceptual tests for ocular side effects of drugs exemplified by various anticonvulsants]. *Ophthalmologe*, 92(2), 182-190.
- Behrens-Baumann, W., Prange, H., Ritter, G., Conrad, B., & Benecke, R. (1981). [Neuro-ophthalmological findings in patients with neurosyphilis (author's transl)]. *Nervenarzt*, 52(2), 90-93.
- Benkert, S. (2012, 04.01.2012). Bilder und Farbmanagement auf dem iPad. from <https://extranet.oew.de/blog/2012/01/04/bilder-und-farbmanagement-auf-dem-ipad/>
- Bimler, D., & Kirkland, J. (2004). Multidimensional scaling of D15 caps: color-vision defects among tobacco smokers? *Vis Neurosci*, 21(3), 445-448.
- Birch, J. (1997a). Clinical use of the City University Test (2nd Edition). *Ophthalmic Physiol Opt*, 17(6), 466-472.
- Birch, J. (1997b). Efficiency of the Ishihara test for identifying red-green colour deficiency. *Ophthalmic Physiol Opt*, 17(5), 403-408.
- Birch, J. (2012). Worldwide prevalence of red-green color deficiency. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 29(3), 313-320. doi: 10.1364/JOSAA.29.000313
- Birch, J., Kollé, R. U., Kunkel, M., Paulus, W., & Upadhyay, P. (1998). Acquired colour deficiency in patients with Parkinson's disease. *Vision Res*, 38(21), 3421-3426.

- Bockelmann, I., Lindner, H., Peters, B., & Pfister, E. A. (2003). [Influence of long term occupational exposure to solvents on colour vision]. *Ophthalmologe*, *100*(2), 133-141. doi: 10.1007/s00347-002-0712-z
- Boynton, R. M. (1988). Color vision. *Annu Rev Psychol*, *39*, 69-100. doi: 10.1146/annurev.ps.39.020188.000441
- Broschmann, D. (2009). [Zusammenstellung der Farbtafeln nach Stilling - Hertel - Velhagen - Broschmann (persönl. Mitteilung)].
- Carroll, J., Neitz, J., & Neitz, M. (2002). Estimates of L:M cone ratio from ERG flicker photometry and genetics. *J Vis*, *2*(8), 531-542. doi: 10.1167/2.8.1
- Cavanagh, P., Maurer, D., Lewis, T., MacLoad, D. A. I., & Mather, G. (1986). Computer-generated screening test for color blindness. *Color Research*, *11*, 63-66.
- Cheng, N. M., Chakrabarti, R., & Kam, J. K. (2014). iPhone applications for eye care professionals: a review of current capabilities and concerns. *Telemed J E Health*, *20*(4), 385-387. doi: 10.1089/tmj.2013.0173
- Chhablani, J., Kaja, S., & Shah, V. A. (2012). Smartphones in ophthalmology. *Indian J Ophthalmol*, *60*(2), 127-131. doi: 10.4103/0301-4738.94054
- Chiu, C. J., et al. (2014). A risk score for the prediction of advanced age-related macular degeneration: development and validation in 2 prospective cohorts. *Ophthalmology*, *121*(7), 1421-1427. doi: 10.1016/j.ophtha.2014.01.016
- Cole, B. (1972). The handicap of abnormal color vision. *Aust J Optom*, *55*:304-310.
- Colour vision test. (2004). from <http://www.lea-test.fi/en/vistests/pediatric/cvtests/colortst.html>
- Computerartikel-Archiv. (2009). RGB-Farbsystem.
- Conway, B. R. (2009). Color vision, cones, and color-coding in the cortex. *Neuroscientist*, *15*(3), 274-290.
- Crossland, M. D., R, S. S., & Macedo, A. F. (2014). Smartphone, tablet computer and e-reader use by people with vision impairment. *Ophthalmic Physiol Opt*, *34*(5), 552-557. doi: 10.1111/opo.12136
- Dain, S. J. (2004). Clinical colour vision tests. *Clin Exp Optom*, *87*(4-5), 276-293.
- Dartnall, H. J., Bowmaker, J. K., & Mollon, J. D. (1983). Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, *220*(1218), 115-130.
- De Valois, R. L., & Abramov, I. (1966). Color vision. *Annu Rev Psychol*, *17*, 337-362. doi: 10.1146/annurev.ps.17.020166.002005
- De Valois, R. L., Abramov, I., & Mead, W. R. (1967). Single cell analysis of wavelength discrimination at the lateral geniculate nucleus in the macaque. *J Neurophysiol*, *30*(3), 415-433.
- Deeb, S. S., & Motulsky, A. G. (1993). Red-Green Color Vision Defects. In R. A. Pagon, M. P. Adam, H. H. Ardinger, T. D. Bird, C. R. Dolan, C. T. Fong, R. J. H. Smith & K. Stephens (Eds.), *GeneReviews(R)*. Seattle (WA).
- Deeb, S. S., & Motulsky, A. G. (1996). Molecular genetics of human color vision. *Behav Genet*, *26*(3), 195-207.
- Diffen. (2015). Android vs. iOS. from http://www.diffen.com/difference/Android_vs_iOS

- DIN, -. (2009). *Farbmessung-Teil 1: Grundbegriffe der Farbmatrik*. Beuth Verlag. Dortmund, T. U. (1999). Unscharfe Farbverarbeitung, Farbbilder. from <http://lrb.cs.uni-dortmund.de/~hildebra/Publications/98lss/Abb5.gif>
- Edsel, B., Parker, J. A., & Emerton, L. A. (1994). Computerized color vision testing. *Can J Ophthalmol*, 29, 125–128.
- Erb, C., & Fahle, M. (2006). [Colour vision and acquired colour vision disturbances. Part I: basic aspects]. *Ophthalmologe*, 103(4), 349-360; quiz 361. doi: 10.1007/s00347-006-1325-8
- Erb, C., et al. (1999). Colour vision disturbances in chronic smokers. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 237(5), 377-380.
- F.Hollwich, J. F. (1977). *Augenheilkunde in Klinik und Praxis* (Vol. Band 1). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Fong, D. S., Barton, F. B., & Bresnick, G. H. (1999). Impaired color vision associated with diabetic retinopathy: Early Treatment Diabetic Retinopathy Study Report No. 15. *Am J Ophthalmol*, 128(5), 612-617.
- Friendly, D. S., & Weiss, I. P. (1985). An automated visual acuity testing computer program using the Apple II system. *Am J Ophthalmol*, 99(2), 188-192.
- Frings, S., et al. (1998). Characterization of ether-a-go-go channels present in photoreceptors reveals similarity to IKx, a K+ current in rod inner segments. *J Gen Physiol*, 111(4), 583-599.
- Fusco, G., Tekin, E., Ladner, R. E., & Coughlan, J. M. (2014). Using Computer Vision to Access Appliance Displays. *ASSETS, 2014*, 281-282. doi: 10.1145/2661334.2661404
- Gegenfurtner, K. R., & Kiper, D. C. (2003). Color vision. *Annu Rev Neurosci*, 26, 181-206. doi: 10.1146/annurev.neuro.26.041002.131116
- Gegenfurtner, K. R., Walter, S., & Braun, D. I. (2010). Visuelle Informationsverarbeitung im Gehirn. from <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/aka.htm>
- Gierling, R. (2001). *Farbmanagement* (1. Auflage ed.). Bonn: mitp-Verlag.
- Gouras, P. (1968). Identification of cone mechanisms in monkey ganglion cells. *J Physiol*, 199(3), 533-547.
- Gouras, P. (1969). Antidromic responses of orthodromically identified ganglion cells in monkey retina. *J Physiol*, 204(2), 407-419.
- Gouras, P. (1991). The perception of colour. In J. R. Cronly-Dillon (Ed.), *Vision and visual dysfunction* (Vol. 6). Basingstoke: Mac-Millan.
- Gouras, P. (1995). Color Vision. In H. Kolb, E. Fernandez & R. Nelson (Eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. Salt Lake City (UT).
- Greenstein, V., Sarter, B., Hood, D., Noble, K., & Carr, R. (1990). Hue discrimination and S cone pathway sensitivity in early diabetic retinopathy. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 31(6), 1008-1014.
- Greve, K. (2005-2010). Die Farbe in der Computergrafik. *Kapitel 1.7*. from <http://farbe-computer.de/kapitel17.html>
- Gurram, M. M. (2013). Ophthalmic cell-phone imaging system: a costless imaging system. *Can J Ophthalmol*, 48(5), e135-139. doi: 10.1016/j.jcjo.2013.06.007

- Haddock, L. J., Kim, D. Y., & Mukai, S. (2013). Simple, inexpensive technique for high-quality smartphone fundus photography in human and animal eyes. *J Ophthalmol*, 2013, 518479. doi: 10.1155/2013/518479
- Heard, P. F., Stone, C. J., Gregory, R. L., & Marmion, V. J. (1987). A new computer graphics test for red/green colour anomaly,. In G. Verriest (Ed.), *Colour Vision Deficiencies VIII* (Vol. 46, pp. 181-194). Dodrecht: Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk.
- Heinsius, E. (1973). *Die Farbsinnstörungen und ihre Prüfung in der Praxis*. Stuttgart: Enke Verlag.
- Helmholtz, v. H. (1867). *Handbuch der physiologischen Optik*. Leipzig: Leopold Voss.
- Hering, E. (1874). *Zur Lehre vom Lichtsinn*. Wien: Akad Wiss, Mathemat-Naturwiss.
- Hoffmann, A., & Menozzi, M. (1998). Computer-basierte Bestimmung von Rot/Grün-Farbanomalien. *Biomed Tech (Berl)*, 43(5), 124-132.
- Hong, J. I., & Chang, B. Y. (2014). Development of the smartphone-based colorimetry for multi-analyte sensing arrays. *Lab Chip*, 14(10), 1725-1732. doi: 10.1039/c3lc51451j
- Hovis, J. K., Cawker, C. L., & Cranton, D. (1996). Comparison of the standard pseudoisochromatic plates--Parts 1 and 2--As screening tests for congenital red-green color vision deficiencies. *J Am Optom Assoc*, 67(6), 320-326.
- Hyon, J. Y., Lee, J. H., & Wee, W. R. (2005). Shift of colorimetric values in ishihara pseudoisochromatic plates with plate aging. *Korean J Ophthalmol*, 19(2), 145-148.
- Ing, E. B., Parker, J. A., & Emerton, L. A. (1994). Computerized colour vision testing. *Can J Ophthalmol*, 29(3), 125-128.
- iPad. (2015a). iPad Modelle vergleichen. from <http://www.apple.com/de/ipad/compare/>
- iPad. (2015b). Technische Daten-iPad. from https://support.apple.com/de_DE/specs/ipad
- Iregren, A., Andersson, M., & Nylen, P. (2002). Color vision and occupational chemical exposures: I. An overview of tests and effects. *Neurotoxicology*, 23(6), 719-733. doi: 10.1016/S0161-813X(02)00088-8
- Jacobs, G. H. (1976). Color vision. *Annu Rev Psychol*, 27, 63-89. doi: 10.1146/annurev.ps.27.020176.000431
- Jaeger, W. (1954). [Hereditary optic atrophy with dominant transmission; with special reference to the associated color-sense disorder]. *Albrecht Von Graefes Arch Ophthalmol*, 155(5), 457-484.
- Jaeger, W. (1977). [Acquired colour-vision-deficiencies caused by side-effects of pharmacotherapy (author's transl)]. *Klin Monbl Augenheilkd*, 170(3), 453-460.
- Jaeger, W., & Schneider, V. J. (1976). Colour vision deficiencies and haemophilia. *Mod Probl Ophthalmol*, 17, 143-146.

- Jagle, H., et al. (2004). Visual short-term effects of Viagra: double-blind study in healthy young subjects. *Am J Ophthalmol*, 137(5), 842-849. doi: 10.1016/j.ajo.2003.11.081
- Kalmus, H. (1955a). The familial distribution of congenital tritanopia with some remarks on similar conditions. *Ann Hum Genet*, 20, 39-56.
- Kalmus, H. (1955b). The familial distribution of congenital tritanopia, with some remarks on some similar conditions. *Ann Hum Genet*, 20(1), 39-56.
- Kaluiny, J., Markowski, D., Kaluzny, B. J., & Sikorski, B. (2006). [Did Leon Wyczokowski suffer from solar maculopathy?]. *Klin Oczna*, 108(10-12), 489-492.
- Kinncar, P. R., Aspinall, P. A., & Lakowski, R. (1972). The diabetic eye and colour vision. *Trans Ophthalmol Soc U K*, 92, 69-78.
- Kolb, H. (1995a). Circuitry for Rod Signals through the Retina. In H. Kolb, E. Fernandez & R. Nelson (Eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. Salt Lake City (UT).
- Kolb, H. (1995b). Cone Pathways through the Retina. In H. Kolb, E. Fernandez & R. Nelson (Eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. Salt Lake City (UT).
- Kolb, H. (1995c). Midget pathways of the primate retina underlie resolution and red green color opponency. In H. Kolb, E. Fernandez & R. Nelson (Eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. Salt Lake City (UT).
- Kolb, H. (1995d). Neurotransmitters in the Retina. In H. Kolb, E. Fernandez & R. Nelson (Eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. Salt Lake City (UT).
- Kolb, H. (1995e). Photoreceptors. In H. Kolb, E. Fernandez & R. Nelson (Eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. Salt Lake City (UT).
- Kolb, H. (1995f). Roles of Amacrine Cells. In H. Kolb, E. Fernandez & R. Nelson (Eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. Salt Lake City (UT).
- Kolb, H. (1995g). S-Cone Pathways. In H. Kolb, E. Fernandez & R. Nelson (Eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. Salt Lake City (UT).
- Kolb, H. (1995h). Simple Anatomy of the Retina. In H. Kolb, E. Fernandez & R. Nelson (Eds.), *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*. Salt Lake City (UT).
- Kolb, H., & Nelson, R. (1996). Hyperpolarizing, small-field, amacrine cells in cone pathways of cat retina. *J Comp Neurol*, 371(3), 415-436. doi: 10.1002/(SICI)1096-9861(19960729)371:3<415::AID-CNE5>3.0.CO;2-5
- Köllner, H. (1912). *Die Störungen des Farbennsinnes*. Berlin: Karger Verlag.
- Koshy, E., Car, J., & Majeed, A. (2008). Effectiveness of mobile-phone short message service (SMS) reminders for ophthalmology outpatient appointments: observational study. *BMC Ophthalmol*, 8, 9. doi: 10.1186/1471-2415-8-9

- Kozak, L. C., & Bullimore, M. A. (1994). Visual changes in human immunodeficiency virus infection. *Optom Vis Sci*, 71(9), 557-561.
- Krastel, H. (1995). Farbsinn. In W. Straub, P. Kroll & H. J. KÜchle (Eds.), *Augenärztliche Untersuchungsmethoden* (2., völlig neubearb. Auflage ed., pp. 537-566). Stuttgart: Enke Verlag.
- Krastel, H. (2007). Farbensinnprüfung in der Praxis. *Klin Monatsbl Augenheilkd*, 224, 29-56.
- Krastel, H., Kolling, G., Schiefer, U., & Bach, M. (2009). [Quality demands on the assessment of colour vision]. *Ophthalmologe*, 106(12), 1083-1102. doi: 10.1007/s00347-009-1976-3
- Kuchenbecker, J., Nicklas, S., & Behrens-Baumann, W. (2010). Colourimetric analysis of three editions of the Velhagen-Broschmann pseudoisochromatic colour plates. *Ophthalmologica*, 224, 47-54
- Kuchenbecker, J., Roehl, F., Bernarding, J., & Behrens-Baumann, W. (2010). [Test-retest reliability of a web-based colour vision test]. *Klin Monatsbl Augenheilkd*, 227(11), 892-896. doi: 10.1055/s-0029-1245314
- Kuchenbecker, J., Röhl, F. W., Weßelburg, A., Bernarding, J., & Behrens-Baumann, W. (2007). Untersuchungen zur Validität eines web-basierten Farbsehtest für Screeninguntersuchungen des Farbensehens. *Ophthalmologe*, 104(1), 47-53.
- Kumar, S., Wang, E. H., Pokabla, M. J., & Noecker, R. J. (2012). Teleophthalmology assessment of diabetic retinopathy fundus images: smartphone versus standard office computer workstation. *Telemed J E Health*, 18(2), 158-162. doi: 10.1089/tmj.2011.0089
- Kurtenbach, A., Flogel, W., & Erb, C. (2002). Anomaloscope matches in patients with diabetes mellitus. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 240(2), 79-84.
- Kurtenbach, A., et al. (1994). Brightness matching and colour discrimination in young diabetics without retinopathy. *Vision Res*, 34(1), 115-122.
- Lachenmayr B., F. D., Hartmann E., Buser A. (2006). *Augen-Brille-Refraktion*. Stuttgart.
- Lamirel, C., Bruce, B. B., Wright, D. W., Newman, N. J., & Biousse, V. (2012). Nonmydriatic digital ocular fundus photography on the iPhone 3G: the FOTO-ED study. *Arch Ophthalmol*, 130(7), 939-940. doi: 10.1001/archophthalmol.2011.2488
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- Lang, G. K. (2000). *Augenheilkunde, Verstehen-Lernen-Anwenden, Histologie und Funktion der Netzhautschichten* (2. Auflage ed.). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Lanthon, P. (1986). [The Tritan album: a pseudo-isochromatic album for the diagnosis of blue-yellow dyschromatopsias]. *Bull Soc Ophthalmol Fr*, 86(10), 1127-1132.
- Lanthon, P. (1987). [Color vision]. *Annee Ther Clin Ophthalmol*, 38, 117-133.
- Lawrenson, J. G., Kelly, C., Lawrenson, A. L., & Birch, J. (2002). Acquired colour vision deficiency in patients receiving digoxin maintenance therapy. *Br J Ophthalmol*, 86(11), 1259-1261.

- Lee, R. M., Oleszczuk, J. D., Hyer, J. N., & Gazzard, G. (2014). Patient acceptance to smartphone technology to monitor and improve glaucoma health-care outcomes. *Eye (Lond)*, *28*(4), 496. doi: 10.1038/eye.2014.22
- Lennie, P., & D'Zmura, M. (1988). Mechanisms of color vision. *Crit Rev Neurobiol*, *3*(4), 333-400.
- Li, J., Tripathi, R. C., & Tripathi, B. J. (2008). Drug-induced ocular disorders. *Drug Saf*, *31*(2), 127-141.
- Lord, K., Shah, V. A., & Krishna, R. (2013). The Eye Handbook: a mobile app in ophthalmic medicine. *Mo Med*, *110*(1), 49-51.
- Luthke, S., Welters, A., Kropf, S., & Bockelmann, I. (2010). [Color vision testing in patients with diabetes mellitus and arterial hypertension]. *Ophthalmologe*, *107*(10), 923-929. doi: 10.1007/s00347-010-2169-9
- M.Wellendorf. (2012). Das neue iPad im Test - Teil 2: Display- und Kameraqualität, Wärmentwicklung und Akku-Laufzeiten. from <http://www.tomshardware.de/ipad-3-benchmark-retina-display,testberichte-241044-2.html>
- Maamari, R. N., D'Ambrosio, M. V., Joseph, J. M., & Tao, J. P. (2014). The efficacy of a novel mobile phone application for goldmann ptosis visual field interpretation. *Ophthal Plast Reconstr Surg*, *30*(2), 141-145. doi: 10.1097/IOP.0000000000000030
- Maamari, R. N., Keenan, J. D., Fletcher, D. A., & Margolis, T. P. (2014). A mobile phone-based retinal camera for portable wide field imaging. *Br J Ophthalmol*, *98*(4), 438-441. doi: 10.1136/bjophthalmol-2013-303797
- Maaranen, T. H., Tuppurainen, K. T., & Mantyjarvi, M. I. (2000). Color vision defects after central serous chorioretinopathy. *Retina*, *20*(6), 633-637.
- Mantyjarvi, M., & Terasvirta, M. (1992). Observations on color vision testing in ocular hypertension and glaucoma. *Int Ophthalmol*, *16*(6), 417-422.
- Mantyjarvi, M., & Tuppurainen, K. (1992). Color vision in Stargardt's disease. *Int Ophthalmol*, *16*(6), 423-428.
- Mantyjarvi, M. I., Nerdrum, K., & Tuppurainen, K. (1992). Color vision in dominant optic atrophy. *J Clin Neuroophthalmol*, *12*(2), 98-103.
- Marré, M., & Marré, E. (1986). *Erworbene Störungen des Farbensehen*. Leipzig: Thieme Verlag.
- Meena, M., & Bhatia, K. (2013). Smart phone as an adjunctive imaging tool to visualize scolex in orbital myocysticercosis. *Int Ophthalmol*, *33*(3), 319-321. doi: 10.1007/s10792-012-9666-6
- Merbs, S. L., & Nathans, J. (1992). Absorption spectra of human cone pigments. *Nature*, *356*(6368), 433-435. doi: 10.1038/356433a0
- Michael, C. R. (1973). Color vision. *N Engl J Med*, *288*(14), 724-728.
- Mollon, J. D., & Reffin, J. E. (1989). A computer-controlled colour vision test that combines the principles of Chibret and Stilling. *J Physiol*, *414*, 5.
- Motulsky, A. G. (1988). Normal and abnormal color-vision genes. *Am J Hum Genet*, *42*(3), 405-407.
- Murali, V. N., & Coughlan, J. M. (2013). Smartphone-Based Crosswalk Detection and Localization for Visually Impaired Pedestrians. *IEEE Int Conf Multimed Expo Workshops, 2013*, 1-7. doi: 10.1109/ICMEW.2013.6618432

- Nakajima, A., Ichikawa, H., Nakagawa, O., Majima, A., & Watanabe, M. (1960). Ishihara test in color-vision defects. Studies on a statistical method for evaluation of the screening efficiency of several plates. *Am J Ophthalmol*, 49, 921-929.
- Nathans, J. (1989). The genes for color vision. *Sci Am*, 260(2), 42-49.
- Nathans, J. (1999). The evolution and physiology of human color vision: insights from molecular genetic studies of visual pigments. *Neuron*, 24(2), 299-312.
- Nathans, J., et al. (1989). Molecular genetics of human blue cone monochromacy. *Science*, 245(4920), 831-838.
- Nathans, J., Merbs, S. L., Sung, C. H., Weitz, C. J., & Wang, Y. (1992). Molecular genetics of human visual pigments. *Annu Rev Genet*, 26, 403-424. doi: 10.1146/annurev.ge.26.120192.002155
- Nathans, J., Piantanida, T. P., Eddy, R. L., Shows, T. B., & Hogness, D. S. (1986). Molecular genetics of inherited variation in human color vision. *Science*, 232(4747), 203-210.
- Nathans, J., et al. (1992). Visual pigments and inherited variation in human vision. *Soc Gen Physiol Ser*, 47, 109-131.
- Nathans, J., Thomas, D., & Hogness, D. S. (1986). Molecular genetics of human color vision: the genes encoding blue, green, and red pigments. *Science*, 232(4747), 193-202.
- Neitz, M., & Neitz, J. (2000). Molecular genetics of color vision and color vision defects. *Arch Ophthalmol*, 118(5), 691-700.
- Oculus. HMC Anomaloskop MR-HMC Anomaloskop R-Gebrauchsanweisung.
- Osterberg, G. (1935). Topography of the layer of rods and cones in the human retina. *Acta Ophthal supp.*, 6:1-103.
- Pearlman, A. L., Birch, J., & Meadows, J. C. (1978). Cerebral color blindness: an acquired defect in hue discrimination. *Trans Am Neurol Assoc*, 103, 133-134.
- Pease, P. L. (1998). Color vision In: Benjamin, W.J.(Ed), *Borish's Clinical Refraction*. Philadelphia: W.B. Saunders Company, Chapter 9.
- Pinckers, A., Nabbe, B., & Vossen, H. (1985). Standard Pseudoisochromatic Plates part 2. *Ophthalmologica*, 190(2), 118-124.
- Rand, G., & Rittler, M. C. (1956). An evaluation of the AO H-R-R pseudoisochromatic plates; a test for detecting, classifying, and estimating the degree of defective color vision. *AMA Arch Ophthalmol*, 56(5), 736-742.
- Reffin, J. P., Astell, S., & Mollon, J. D. (1991). Trials of a computer-controlled colour vision test that preserves the advantages of pseudoisochromatic plates. In B. Drum, J. D. Moreland & A. Serra (Eds.), *Colour Vision Deficiencies X* (pp. 69-76). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Ripps, H., & Weale, R. A. (1969). Color vision. *Annu Rev Psychol*, 20, 193-216. doi: 10.1146/annurev.ps.20.020169.001205
- Rizzo, M., Smith, V., Pokorny, J., & Damasio, A. R. (1993). Color perception profiles in central achromatopsia. *Neurology*, 43(5), 995-1001.

- Röhl, F.-W., Theuerkauf, A., Kuchenbecker, J., & Weßelburg, A. (2007). *Einsatz eines web-basierten Farbsehtest für Screeninguntersuchungen des Farbsehens*. Paper presented at the GMDS-Tagung Augsburg.
- Roorda, A., & Williams, D. R. (1999). The arrangement of the three cone classes in the living human eye. *Nature*, *397*(6719), 520-522. doi: 10.1038/17383
- Roy, M. S., Gunkel, R. D., & Podgor, M. J. (1986). Color vision defects in early diabetic retinopathy. *Arch Ophthalmol*, *104*(2), 225-228.
- Roy, M. S., Rodgers, G., Gunkel, R., Noguchi, C., & Schechter, A. (1987). Color vision defects in sickle cell anemia. *Arch Ophthalmol*, *105*(12), 1676-1678.
- Ruamviboonsuk, P., Sudsakorn, N., Somkijrunroj, T., Engkagul, C., & Tiensuwan, M. (2012). Reliability of visual acuity measurements taken with a notebook and a tablet computer in participants who were illiterate to Roman characters. *J Med Assoc Thai*, *95 Suppl 3*, S109-116.
- Russo, A., Morescalchi, F., Costagliola, C., Delcassi, L., & Semeraro, F. (2015). Comparison of smartphone ophthalmoscopy with slit-lamp biomicroscopy for grading diabetic retinopathy. *Am J Ophthalmol*, *159*(2), 360-364 e361. doi: 10.1016/j.ajo.2014.11.008
- Shanmugam, P. M., Mishra, D., & Ramanjulu, R. (2014). Fluorescein fundus angiography using a smartphone. *Retina*, *34*(3), e6-7. doi: 10.1097/IAE.0000000000000132
- Sharpe, L. T., et al. (1998). Red, green, and red-green hybrid pigments in the human retina: correlations between deduced protein sequences and psychophysically measured spectral sensitivities. *J Neurosci*, *18*(23), 10053-10069.
- Sommerhalder, J., et al. (1998). Colour vision in AIDS patients without HIV retinopathy. *Vision Res*, *38*(21), 3441-3446.
- Spektrum. (2015). Anomaloskop: Prüffeld zum Ermitteln von Farbsinnstörungen., from <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/anomaloskop/567>
- Spektrum.de. (2015). Farbverwechslung from <http://www.spektrum.de/lexikon/optik/farbverwechslung/931>
- Stanzel, B. V., & Meyer, C. H. (2012). [Smartphones in ophthalmology : Relief or toys for physicians?]. *Ophthalmologe*, *109*(1), 8-20. doi: 10.1007/s00347-011-2425-7
- Stilling, J. (1877). *Die Prüfung des Farbsinns beim Eisenbahn- und Marinepersonal*. Cassel: Fischer.
- Suto, S. e. a. (2014a). Fluorescein fundus angiography with smartphone. *Retina*, *34*(1), 203-205. doi: 10.1097/IAE.0000000000000041
- Suto, S. e. a. (2014b). [Photography of anterior eye segment and fundus with smartphone]. *Nihon Ganka Gakkai Zasshi*, *118*(1), 7-14.
- Swanson, W. H., & Cohen, J. M. (2003). Color vision. *Ophthalmol Clin North Am*, *16*(2), 179-203.
- Tablet-PCs.eu. (2015a). iPad – Das Trend-Tablet von Apple.
- Tablet-PCs.eu. (2015b). Tablet-Funktionen. from <http://www.tablet-pcs.eu/tablet-funktionen.html>

- Thompson, D. G., Howarth, F., Taylor, H., Levy, I. S., & Birch, J. (1979). Defective colour vision in diabetes: a hazard to management. *Br Med J*, 1(6167), 859-860.
- Tietjen, A., et al. (2013). [New options for digital photo documentation during routine examination for ophthalmologists]. *Klin Monbl Augenheilkd*, 230(6), 604-610. doi: 10.1055/s-0032-1328407
- Trusov, M. S. (1972). [Color vision disorders in hypertonic disease and arteriosclerosis]. *Oftalmol Zh*, 27(1), 19-22.
- Velhagen, K., & Broschmann, D. (1995). *Tafeln zur Prüfung des Farbensehens* (30., unveränd. Auflage ed.). Stuttgart New-York: Thieme Verlag.
- Velhagen, K., & Broschmann, D. (1997). *Tafeln zur Prüfung des Farbensehens* (31., unveränd. Auflage ed.). Stuttgart New-York: Thieme Verlag.
- Velhagen, K., & Broschmann, D. (2000). *Tafeln zur Prüfung des Farbensehens* (32., unveränd. Auflage ed.). Stuttgart New-York: Thieme Verlag.
- Verriest, G. (1963). Further studies on acquired deficiency of color discrimination. *J Opt Soc Amer*, 53, 185-195.
- Vistamehr, S., Walsh, T. J., & Adelman, R. A. (2007). Ethambutol neuroretinopathy. *Semin Ophthalmol*, 22(3), 141-146. doi: 10.1080/08820530701457134
- Vola, J. L., Riss, M., Jayle, G. E., Gosset, A., & Tassy, A. (1972). Acquired deficiency of colour vision in lateral homonymous hemianopsia. *Mod Probl Ophthalmol*, 11, 150-159.
- Walraven, P. L. (1972). Color vision. *Annu Rev Psychol*, 23, 347-374. doi: 10.1146/annurev.ps.23.020172.002023
- Weitz, C. J., et al. (1992). Human tritanopia associated with two amino acid substitutions in the blue-sensitive opsin. *Am J Hum Genet*, 50(3), 498-507.
- Weitz, C. J., Went, L. N., & Nathans, J. (1992). Human tritanopia associated with a third amino acid substitution in the blue-sensitive visual pigment. *Am J Hum Genet*, 51(2), 444-446.
- Wikipedia. (2010). CIE-Normvalenzsystem. from <http://de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem>
- Wikipedia. (2015a). Android. from [http://de.wikipedia.org/wiki/Android_\(Betriebssystem\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Android_(Betriebssystem))
- Wikipedia. (2015b). Farbraum. from <http://de.wikipedia.org/wiki/Farbraum>
- Wikipedia. (2015c). Retina Display. from <http://de.wikipedia.org/wiki/Retina-Display>
- Wikipedia. (2015d). RGB-Farbraum. from http://de.wikipedia.org/wiki/RGB-Farbraum_-_Adobe-RGB-281998.29-Farbraum
- Wikipedia. (2015e). Tabletcomputer. from <http://de.wikipedia.org/wiki/Tabletcomputer>
- Wikipedia. (2015f). Touchscreen. from <http://de.wikipedia.org/wiki/Touchscreen>
- Wikipedia. (2015). Munsell-Farbsystem. from <http://de.wikipedia.org/wiki/Munsell-Farbsystem>
- Wright, W. (1952). The characteristics of tritanopia. *J Opt Soc Amer*, 42:509-520.
- Yamaguchi, T., Motulsky, A. G., & Deeb, S. S. (1997). Visual pigment gene structure and expression in human retinae. *Hum Mol Genet*, 6(7), 981-990.
- Young, T. (1802). On the theory of light and colour. *Phil Trans Roy Soc*, 20-71.

-
- Zhang, Z. T., Zhang, S. C., Huang, X. G., & Liang, L. Y. (2013). A pilot trial of the iPad tablet computer as a portable device for visual acuity testing. *J Telemed Telecare*, 19(1), 55-59. doi: 10.1177/1357633X12474964
- Zhigang Xiang, R. A. P. (2000). *Computergrafik*.
- Zrenner, E. (1985). Farbsinnprüfungen: Grundlagen, Meßverfahren und Anwendungen bei angeborenen und erworbenen Farbsinnstörungen. In O. E. Lund & T. N. Waubke (Eds.), *Augenerkrankungen im Kindesalter* (Vol. 106, pp. 263-286).
- Zrenner, E. (1987). Untersuchungsstrategien bei Farbsinnstörungen. In O. E. Lund & T. N. Waubke (Eds.), *Okuläre Symptome, Strategien der Untersuchung* (Vol. 112, pp. 84-101). Stuttgart: Enke Verlag.
- Zrenner, E., Riedel, K. G., Adamczyk, R., Gilg, T., & Liebhardt, E. (1986). Effects of ethyl alcohol on the electrooculogram and color vision. *Doc Ophthalmol*, 63(4), 305-312.
- Zvornicanin, E., Zvornicanin, J., & Hadziefendic, B. (2014). The Use of Smart phones in Ophthalmology. *Acta Inform Med*, 22(3), 206-209. doi: 10.5455/aim.2014.22.206-209

Danksagung

Eine wissenschaftliche Arbeit ist nie das Werk einer einzelnen Person, deshalb ist es jetzt an der Zeit, mich bei allen Menschen zu bedanken, die mir die Erstellung meiner Dissertation ermöglicht haben.

An der ersten Stelle gilt mein Dank Herr Privat Dozent Dr. med. J. Kuchenbecker für die Idee zu diesem interessanten Promotionsthema und die exzellente Betreuung. Seine motivierende Unterstützung und Hilfsbereitschaft bei allen Fragen und Problemen haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ohne seinen wertvollen akademischen Rat wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Weiterhin möchte ich mich ebenfalls bei Dr. U. Gauger für die Auswertung der Daten, insbesondere für die Beratung und die Auswahl der geeigneten statistischen Testverfahren bedanken.

Mein Dankeschön gilt ebenfalls allen Probanden für ihre freiwillige Bereitschaft an den Untersuchungen teilzunehmen.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich meinen Eltern aussprechen, die diese Arbeit in allen Phasen mit jeder möglichen Unterstützung bedacht haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Mann, Krisos, ohne seine liebevolle Fürsorge wäre diese Arbeit nicht zu dem Werk geworden, das es heute ist.

Ehrenerklärung

Ich erkläre, dass ich die der Medizinischen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität zur Promotion eingereichte Dissertation mit dem Titel

Untersuchung des Farbsehens mittels Pigmentfarbtafeln und Tablet-PC (iPad 2®)

mit Unterstützung durch Herrn Privat Dozent Dr. med. J. Kuchenbecker und den Statistiker Herrn Dr. U. Gauger ohne sonstige Hilfe durchgeführt und bei der Abfassung der Dissertation keine anderen als die dort aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Bei der Abfassung der Dissertation sind Rechte Dritter nicht verletzt worden.

Ich habe diese Dissertation bisher an keiner in- oder ausländischen Hochschule zur Promotion eingereicht. Ich übertrage der Medizinischen Fakultät das Recht, weitere Kopien meiner Dissertation herzustellen und zu vertreiben.

Berlin, 15. Juli 2015

Panagiota Tsimpri

Lebenslauf

Personaldaten

Name: **Panagiota Tsimpri**

Geburtstag/-ort: **11.12.1984, Athen (Griechenland)**

Adresse: **Barnimstraße 38, Berlin 10249**

Staatsbürgerschaft: **Griechisch**

Telefonnummer: **015117282651**

E-Mail: **panagiotatsimpri@hotmail.com**

Familienstand: **verheiratet**

Beruflicher Werdegang und Facharztausbildung

01.09.2014 bis heute: Fachärztin an der Klinik für Augenheilkunde Berlin Buch

11.08.2014: Fachärztin für Augenheilkunde

09.05.2014: Europäische Facharztprüfung und Erhalt des Titels FEBO (Fellow of the European Board of Ophthalmology)

01.12.2011 bis 30.08.2014: Assistenzärztin an der Klinik für Augenheilkunde Berlin Buch

15.04.2010 bis 30.11.2011: Assistenzärztin an der Klinik für Augenheilkunde, St. Joseph-Stift Bremen

06.04.2009 bis 31.03.2010: Assistenzärztin an der Klinik für Augenheilkunde, SRH Zentralklinikum Suhl

Approbation – Ärztekammer-Mitgliedschaft

24.03.2009: Approbation als Ärztin in Deutschland

12.08.2008: Approbation als Ärztin in Griechenland

22.06.2009: Mitgliedschaft in der Deutsche Ärztekammer

Akademische Ausbildung

30.09.2002 bis 21.07.2008: Medizinstudium an der Universität Patras

(Griechenland) – Fakultät für Gesundheitswissenschaften – Fachbereich Medizin

Mitgliedschaften

Berufsband der Augenärzte (BVA)

Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft (DOG)

Schulische Ausbildung

1999-2002 : 1es Lyzeum Chaidari , Athene, Griechenland

07.2002 : Griechische Reifeprüfung

Sprachen

- Deutsch Niveau: Verhandlungssicher (C1)

- Englisch Niveau: Verhandlungssicher, Certificate of Proficiency in English
(University of Cambridge)

- Griechisch Niveau: Muttersprache

EDV-Kenntnisse

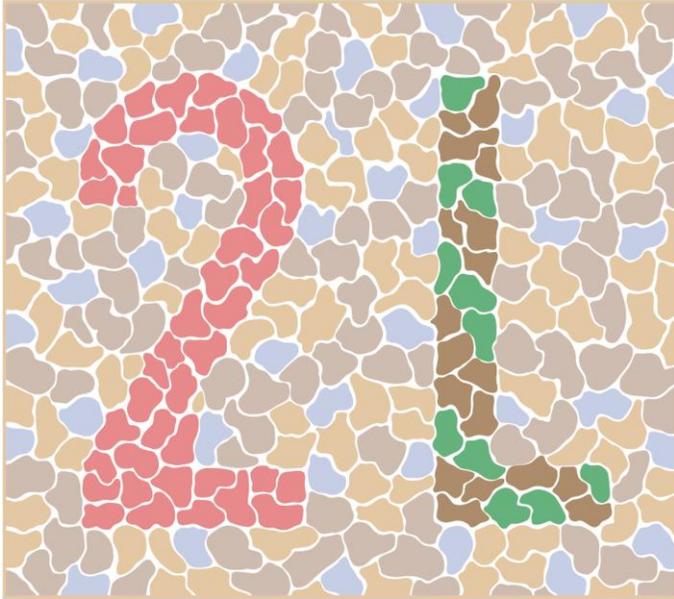
Word, Excel, Internet

Berlin, 15. Juli 2015

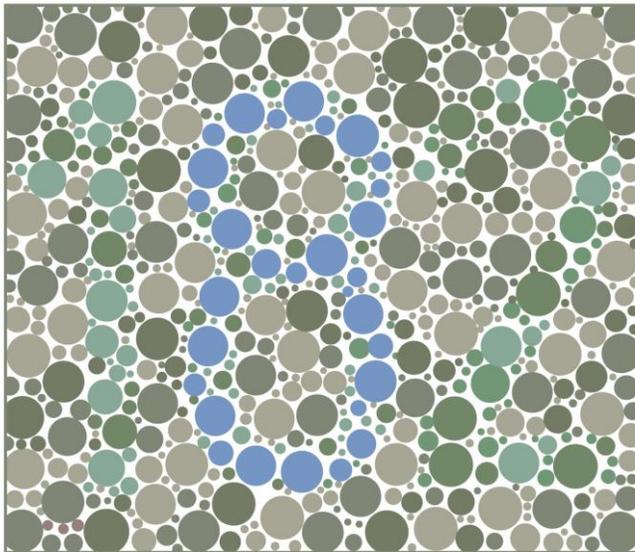
Panagiota Tsimpri

Anhang 1

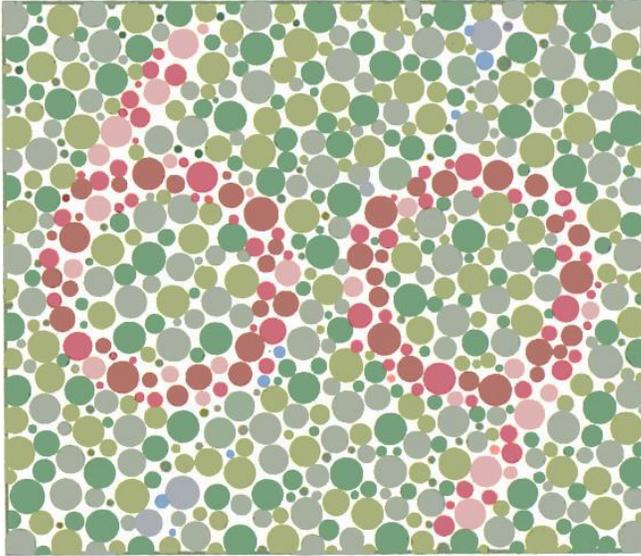
Verwendete Pigmentfarbtafeln der 34. Auflage (2011)
(Velhagen/Broschmann/Kuchenbecker)



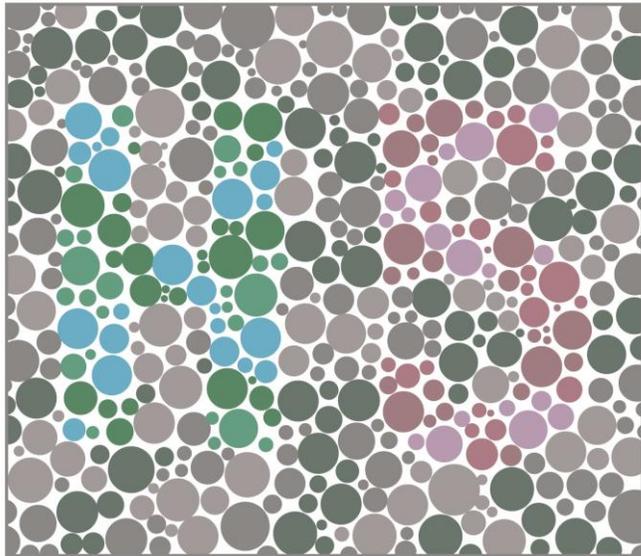
Tafel 1: Demonstrationstafel (Zeichen: 2L)



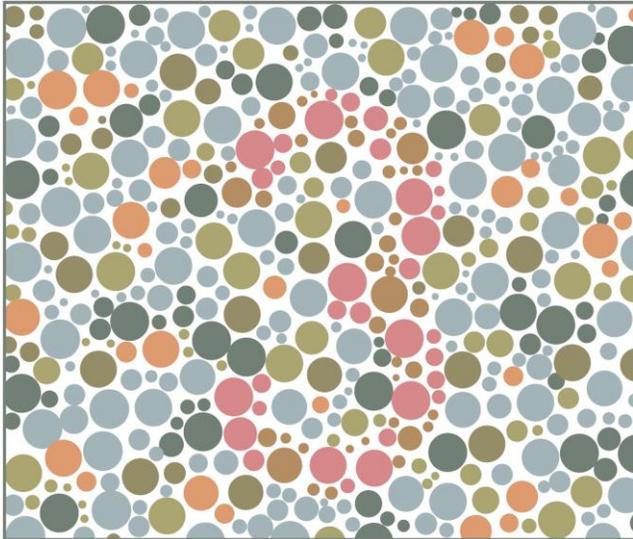
Tafel 2: Diagnostische Tafel (Zeichen: 182)



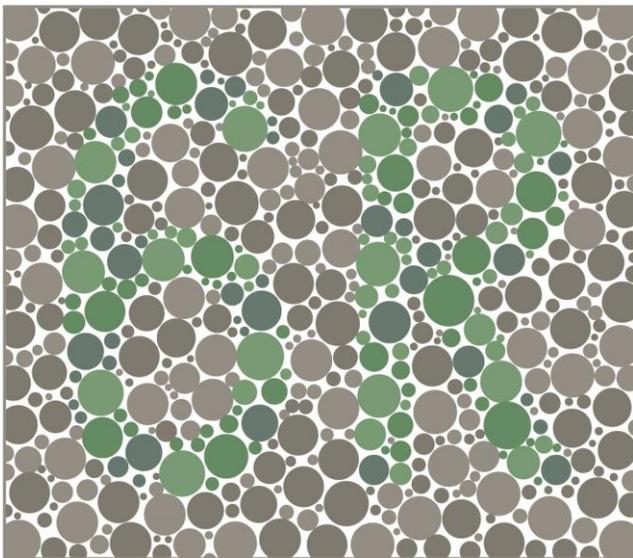
Tafel 3: Tafel mit alternativem Sehzeichen (Zeichen: 69)



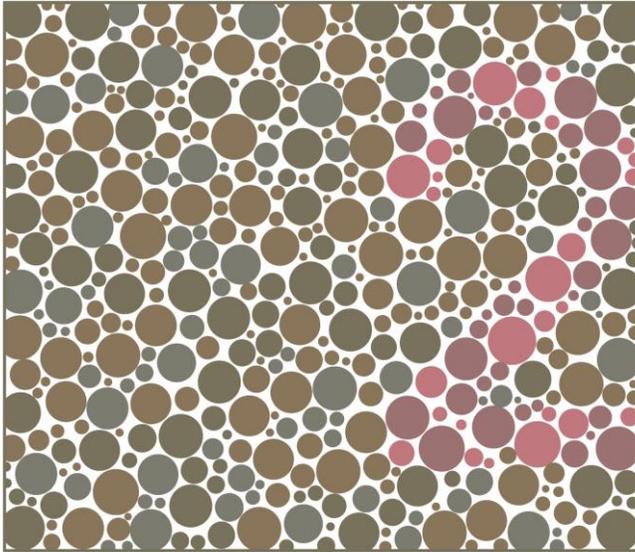
Tafel 4: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: H5)



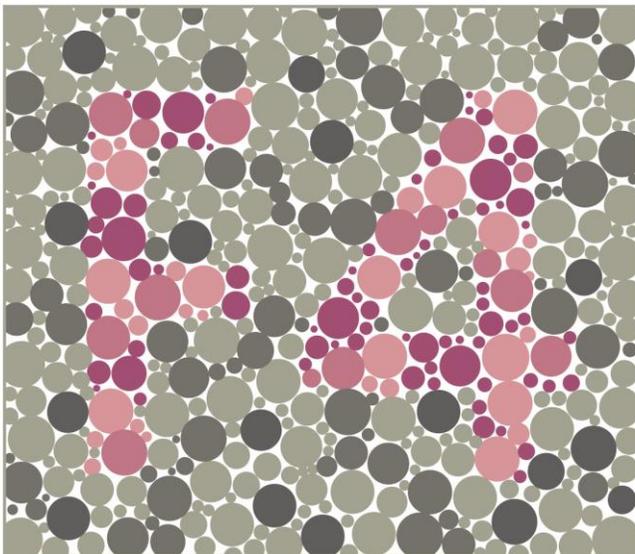
Tafel 5: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: 3)



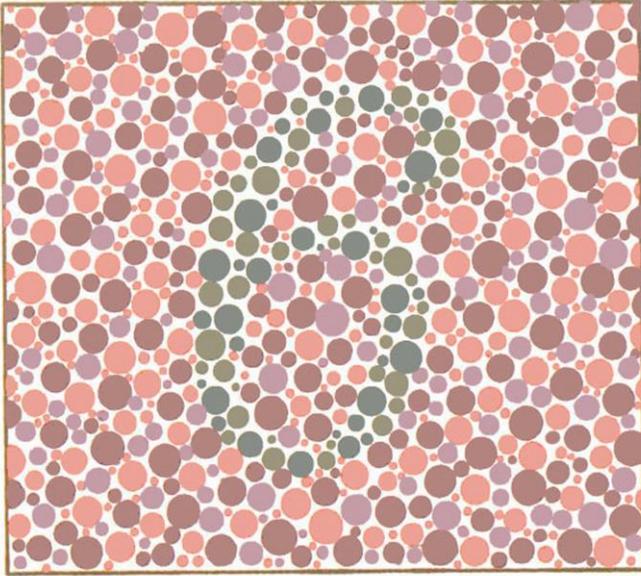
Tafel 6: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: 6R)



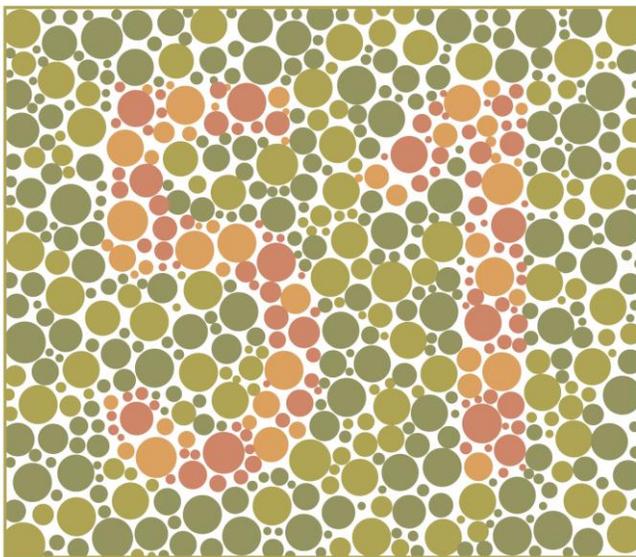
Tafel 7: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: 2)



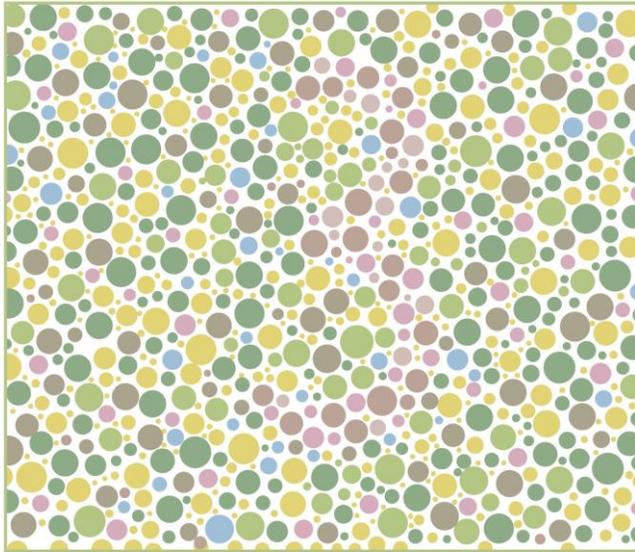
Tafel 8: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: F4)



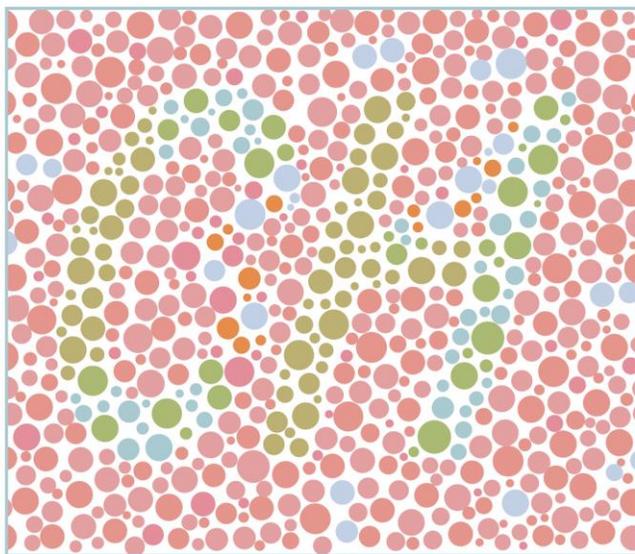
Tafel 9: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: 6)



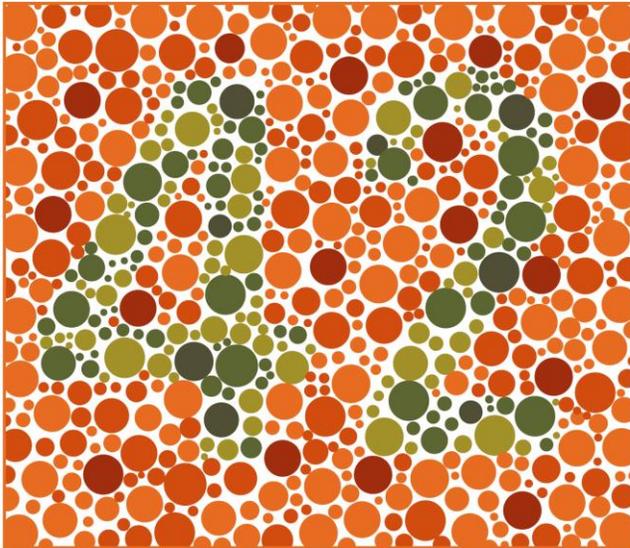
Tafel 10: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: 51)



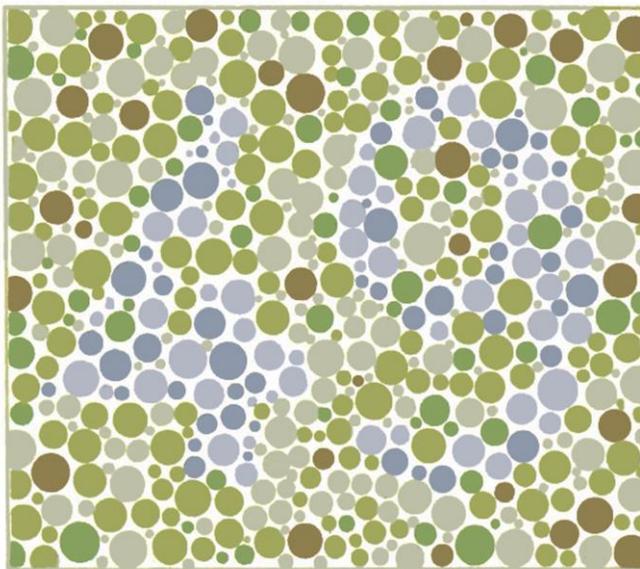
Tafel 11: Tafel mit alternativem Sehzeichen (Zeichen: 3)



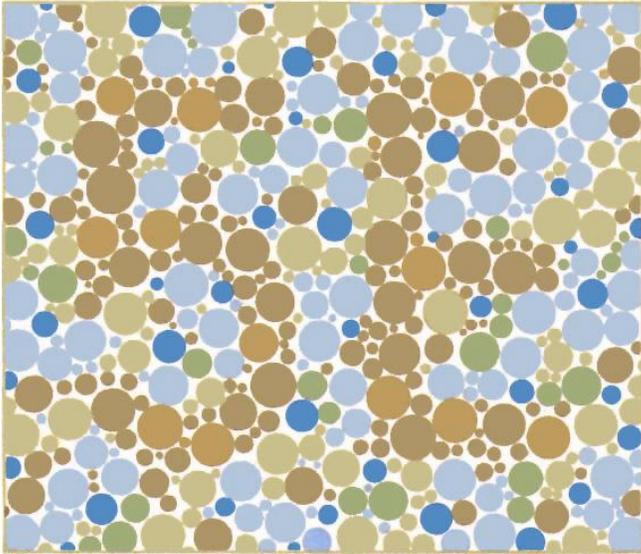
Tafel 12: Tafel mit alternativem Sehzeichen (Zeichen: CH)



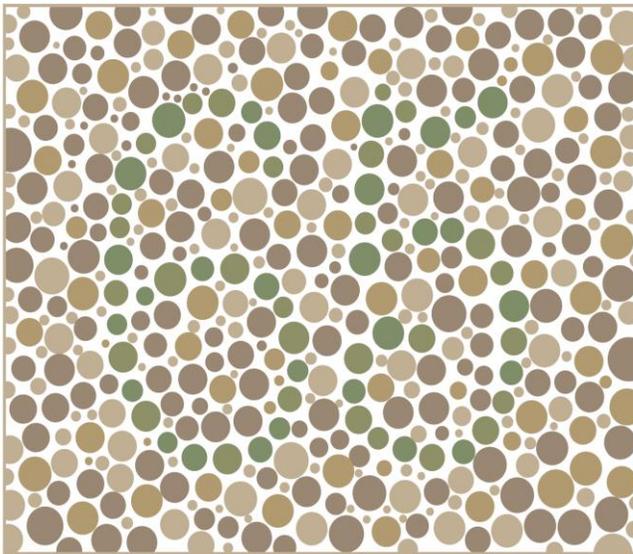
Tafel 13: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen 42)



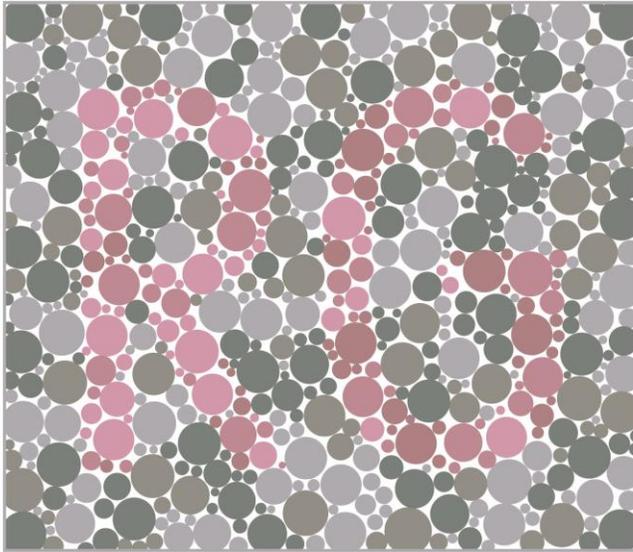
Tafel 14: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen 49)



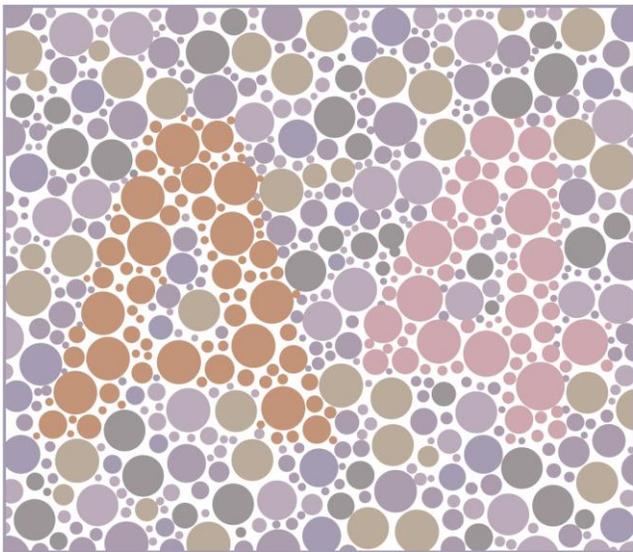
Tafel 15: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen 5E)



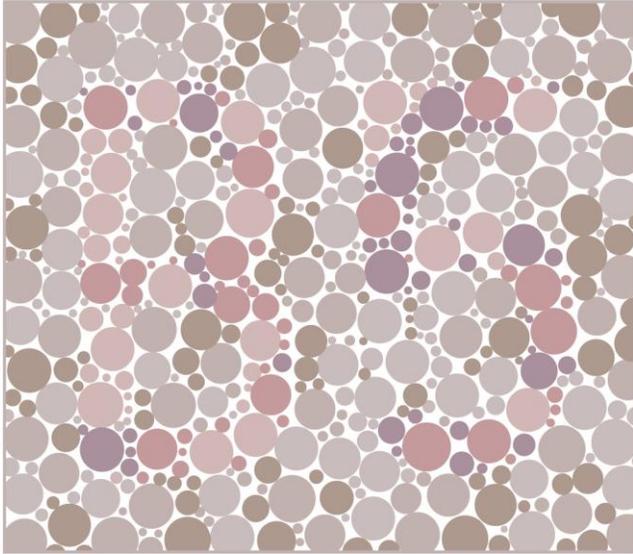
Tafel 16: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: 65)



Tafel 17: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: RG)



Tafel 18: Tafel mit verschwindenden Sehzeichen (Zeichen: A4)



Tafel 19: Tafel mit alternativem Sehzeichen (Zeichen: B5)

Anhang 2

iPad® – Technische Daten(Apple, 2013b)

Abmessungen und Gewicht

Höhe:

242,8 mm

Breite:

189,7 mm

Tiefe:

13,4 mm

Gewicht:

0,68 kg (Wi-Fi-Modell)

0,73 kg (Wi-Fi- + 3G-Modell)

Display

9,7"-Multi-Touch-Widescreen-Display mit LED-Hintergrundbeleuchtung,
Hochglanzanzeige und IPS-Technologie (24,63 cm Diagonale)

Auflösung von 1024 x 768 Pixeln bei 132 ppi

Fettabweisende Beschichtung

Unterstützung für die Anzeige mehrerer Sprachen und Zeichen gleichzeitig

Drahtlostechnologie und Funknetz

Wi-Fi-Modell

- Wi-Fi (802.11 a/b/g/n)
- Bluetooth 2.1 + EDR

Wi-Fi- + 3G-Modell

- UMTS/HSDPA (850, 1900, 2100 MHz)
- GSM/EDGE (850, 900, 1800, 1900 MHz)
- Nur Datentransfer
- Wi-Fi (802.11 a/b/g/n)
- Bluetooth 2.1 + EDR

Ortungsfunktion

- Wi-Fi
- Digitaler Kompass
- Assisted GPS (beim Wi-Fi- + 3G-Modell)
- Funknetzunterstützung (beim Wi-Fi- + 3G-Modell)

Lieferumfang

- iPad
- Dock Connector-zu-USB-Kabel
- 10W Power Adapter (Netzteil)
- Dokumentation

Kapazität

- 16 GB, 32 GB oder 64 GB Flash-Laufwerk

Prozessor

- Speziell entwickelter, hochleistungsfähiger 1 GHz Apple-A4-SOC-Chip
(System-on-a-Chip) mit niedrigem Stromverbrauch

Sensoren

- Beschleunigungssensor
- Umgebungslichtsensor

Audiowiedergabe

- Frequenzbereich: 20 Hz bis 20.000 Hz
- Unterstützte Audioformate: HE-AAC (V1), AAC (16 bis 320 KBit/Sek.), Protected AAC (aus dem iTunes Store), MP3 (16 bis 320 KBit/Sek.), MP3 VBR, Audible (Formate 2, 3 und 4), Apple Lossless, AIFF und WAV
- Maximale Lautstärke vom Benutzer festlegbar

TV und Video

- Unterstützung für 1024 x 768 Pixel mit dem Dock Connector-zu-VGA-Adapter; 576p und 480p mit dem Apple AV-Kabel (Komponentenvideo); 576i und 480i mit dem Apple AV-Kabel (Composite-Video)
- H.264 Video mit bis zu 720p und 30 Bildern pro Sekunde, Main Profile Level 3.1 mit AAC-LC Audio mit bis zu 160 KBit/Sek., 48 kHz, Stereo-Audio in den Formaten .m4v, .mp4 und .mov; MPEG-4 Video mit bis zu 2,5 MBit/Sek., 640 x 480 Pixel, 30 Bilder pro Sekunde, Simple Profile mit AAC-LC Audio mit bis zu 160 KBit/Sek., 48 kHz, Stereo-Audio in den Formaten .m4v, .mp4 und .mov; Motion JPEG (M-JPEG) mit bis zu 35 MBit/Sek., 1280 x 720 Pixel, 30 Bilder pro Sekunde, Audio im ulaw-Format, PCM-Stereo-Audio im .avi-Format

Unterstützte E-Mail-Anhänge

- Anzeigbare Dokumenttypen: .jpg, .tiff, .gif (Bilder); .doc und .docx (Microsoft Word); .htm und .html (Webseiten); .key (Keynote); .numbers (Numbers); .pages (Pages); .pdf (Vorschau und Adobe Acrobat); .ppt und .pptx (Microsoft PowerPoint); .txt (Text); .rtf (Rich Text Format); .vcf (Kontaktdaten); .xls und .xlsx (Microsoft Excel)

Sprachen

- Sprachunterstützung für Englisch, Französisch, Deutsch, Japanisch, Niederländisch, Italienisch, Spanisch, Chinesisch (vereinfacht), Russisch
- Tastaturunterstützung für Englisch (USA), Englisch (Großbritannien), Französisch (Frankreich, Kanada), Deutsch, Japanisch (QWERTY), Niederländisch, Flämisch, Spanisch, Italienisch, Chinesisch (vereinfacht – Handschrift und Pinyin), Russisch
- Wörterbuchunterstützung für Englisch (USA), Englisch (Großbritannien), Französisch, Französisch (Kanada), Französisch (Schweiz), Deutsch, Japanisch, Niederländisch, Flämisch, Spanisch, Italienisch, Chinesisch (vereinfacht – Handschrift und Pinyin), Russisch

Bedienungshilfen

- Unterstützung für die Wiedergabe von Inhalten mit erweiterten Untertiteln
- VoiceOver Bildschirmlesetechnologie
- Bildschirmfüllender Zoom
- Weiß auf Schwarz
- Mono-Audioausgabe

Batterie und Stromversorgung⁴

- Integrierte wiederaufladbare Lithium-Polymer-Batterie (25 Wattstunden)
- Bis zu 10 Stunden Surfen im Web mit Wi-Fi, Video- oder Musikwiedergabe

- Aufladen über das Netzteil oder einen USB-Anschluss am Computer

Ein- und Ausgänge

- 30-poliger Dock-Anschluss
- Stereo-Kopfhöreranschluss (3,5 mm)
- Integrierter Lautsprecher
- Mikrofon
- Fach für Micro-SIM-Karte (nur beim Wi-Fi + 3G Modell)

Tasten und Steuerelemente am Gehäuse

- Ein/Aus, Standby
- Display-ausrichtung verriegeln
- Lautstärke
- Home

Systemvoraussetzungen für Mac

- Mac mit USB 2.0 Anschluss
- Mac OS X 10.5.8 (oder neuer)
- iTunes 9.0 oder neuer
- iTunes Store Account
- Internetzugang

Systemvoraussetzungen für Windows

- PC mit USB 2.0 Anschluss
- Windows 7, Windows Vista, Windows XP Home oder Professional mit Service Pack 3 (oder neuer)
- iTunes 9.0 oder neuer
- iTunes Store Account
- Internetzugang

Umgebungsbedingungen

- Betriebstemperatur: 0 °C bis 35 °C
- Lagertemperatur: -20 °C bis 45 °C
- Relative Luftfeuchtigkeit: 5 % bis 95 %, nicht kondensierend

iPad®2- Technische Daten (Apple, 2013a)

Modelle

- Wi-Fi
- Wi-Fi + 3G

Abmessungen und Gewicht

Wi-Fi

- Höhe: 241,2 mm
- Breite: 185,7 mm
- Tiefe: 8,8 mm
- Gewicht: 601 g

Wi-Fi + 3G

- Höhe: 241,2 mm
- Breite: 185,7 mm
- Tiefe: 8,8 mm

- Gewicht: 613 g (Wi-Fi + 3G Modell)

Kapazität

- 16 GB

Drahtlose Kommunikation und Mobilfunk

Wi-Fi

- Wi-Fi (802.11a/b/g/n)
- Bluetooth 2.1 + EDR Technologie

Wi-Fi + 3G

- Wi-Fi (802.11a/b/g/n)
- Bluetooth 2.1 + EDR Technologie
- Wi-Fi + 3G Modell: UMTS/HSDPA/HSUPA (850, 900, 1900, 2100 MHz), GSM/EDGE (850, 900, 1800, 1900 MHz)
- Nur Daten

Display

- 9,7" Multi-Touch Hochglanz-Widescreendisplay (24,63 cm Diagonale) mit LED-Hintergrundbeleuchtung und IPS-Technologie
- Auflösung von 1024 x 768 Pixeln bei 132 ppi
- Fettabweisende Beschichtung
- Unterstützung für die Anzeige mehrerer Sprachen und Zeichen gleichzeitig

Chip

- Dual-Core A5

Kamera, Fotos und Videoaufnahme

- Rückkamera: Videoaufnahme, HD (720p) mit bis zu 30 Bildern pro Sekunde und Audio, Fotokamera mit 5fach Digitalzoom
- Frontkamera: Videoaufnahme, VGA mit bis zu 30 Bildern pro Sekunde und Audio, Fotokamera in VGA-Qualität
- Belichtungsanpassung per Fingertipp für Videos und Fotos
- Geotagging für Fotos und Videos via Wi-Fi

Externe Tasten und Anschlüsse

Externe Tasten und Steuerelemente Anschlüsse und Ein-/Ausgänge

Stromversorgung und Batterie



Wi-Fi

- Integrierte wiederaufladbare Lithium-Polymer-Batterie mit 25 Wattstunden
- Bis zu 10 Stunden Surfen im Web mit Wi-Fi, Video- oder Musikwiedergabe
- Aufladen über das Netzteil oder einen USB Anschluss am Computer

Wi-Fi + 3G

- Integrierte wiederaufladbare Lithium-Polymer-Batterie mit 25 Wattstunden

- Bis zu 10 Stunden Surfen im Web mit Wi-Fi, Video- oder Musikwiedergabe
- Bis zu 9 Stunden Surfen im Web über ein mobiles Datennetz
- Aufladen über das Netzteil oder einen USB Anschluss am Computer

Eingabe/Ausgabe

Wi-Fi

- 30-poliger Dock-Anschluss
- 3,5 mm Stereo-Minianschluss (Kopfhörer)
- Integrierter Lautsprecher
- Mikrofon

Wi-Fi + 3G

- 30-poliger Dock-Anschluss
- 3,5 mm Stereo-Minianschluss (Kopfhörer)
- Integrierter Lautsprecher
- Mikrofon
- Fach für Micro-SIM-Karte (nur beim Wi-Fi + 3G Modell)

Sensoren

- Beschleunigungssensor
- Umgebungslichtsensor
- Gyrosensor

Ortung

Wi-Fi

- Wi-Fi
- Digitaler Kompass

Wi-Fi + 3G

- Wi-Fi
- Digitaler Kompass
- Assisted GPS
- Mobilfunknetz

Audiowiedergabe

- Frequenzbereich: 20 Hz bis 20.000 Hz
- Unterstützte Audioformate: HE-AAC (V1 und V2), AAC (8 bis 320 KBit/s), Protected AAC (aus dem iTunes Store), MP3 (8 bis 320 KBit/s), MP3 VBR, Audible (Formate 2, 3 und 4, Audible Enhanced Audio, AAX und AAX+), Apple Lossless, AIFF und WAV
- Vom Benutzer festlegbare maximale Lautstärke
- Dolby Digital 5.1 Surround-Sound Pass-Through mit Apple Digital AV Adapter (separat erhältlich)

TV und Video

- Unterstützung für Air Play Mirroring an Apple TV mit 720p
- „Bildschirme synchronisieren“ und Videoausgabe: Unterstützung für bis zu 1080p mit Apple Digital AV Adapter oder Apple VGA Adapter (Adapter separat erhältlich)
- Videoausgabe: Unterstützung für 576p und 480p mit Apple AV Kabel (Komponentenvideo) und für 576i und 480i mit Apple AV Kabel für Composite-Video (Kabel separat erhältlich)
- Unterstützte Videoformate: H.264 Video: bis zu 1080p, 30 Bilder pro Sekunde,

High Profile Level 4.1 mit AAC-LC Audio bis zu 160 KBit/s, 48 kHz, Stereo-Audio in den Formaten .m4v, .mp4 und .mov; MPEG-4 Video: bis zu 2,5 MBit/s, 640 x 480 Pixel, 30 Bilder pro Sekunde, Simple Profile mit AAC-LC Audio bis zu 160 KBit/s, 48 kHz, Stereo-Audio in den Formaten .m4v, .mp4 und .mov; Motion JPEG (M-JPEG): bis zu 35 MBit/s, 1280 x 720 Pixel, 30 Bilder pro Sekunde, Audio im Format ulaw, PCM Stereo-Audio im Format .avi

Unterstützte E-Mail Anhänge

Anzeigbare Dokumenttypen: .jpg, .tiff und .gif (Bilder), .doc und .docx (Microsoft Word), .htm und .html (Webseiten), .key (Keynote), .numbers (Numbers), .pages (Pages), .pdf (Vorschau und Adobe Acrobat), .ppt und .pptx (Microsoft PowerPoint), .txt (Text), .rtf (Rich Text Format), .vcf (Kontaktdaten), .xls und .xlsx (Microsoft Excel)

Sprachen

- Sprachunterstützung: Englisch (USA), Englisch (Großbritannien), Chinesisch (vereinfacht), Chinesisch (traditionell), Französisch, Deutsch, Italienisch, Japanisch, Koreanisch, Spanisch, Arabisch, Katalanisch, Kroatisch, Tschechisch, Dänisch, Niederländisch, Finnisch, Griechisch, Hebräisch, Ungarisch, Indonesisch, Malaiisch, Norwegisch, Polnisch, Portugiesisch (Portugal), Portugiesisch (Brasilien), Rumänisch, Russisch, Slowakisch, Schwedisch, Thailändisch, Türkisch, Ukrainisch, Vietnamesisch
- Tastaturunterstützung für Englisch (USA), Englisch (Großbritannien), Chinesisch – vereinfacht (Handschrift, Pinyin, Stroke), Chinesisch – traditionell (Handschrift, Pinyin, Zhuyin, Cangjie, Stroke), Französisch (Frankreich), Französisch (Kanada), Französisch (Schweiz), Deutsch (Deutschland), Deutsch (Schweiz), Italienisch, Japanisch (Romaji, Kana), Koreanisch, Spanisch, Arabisch, Bulgarisch, Katalanisch, Cherokee, Kroatisch, Tschechisch, Dänisch, Niederländisch, Emoji, Estnisch, Finnisch, Flämisch, Griechisch, Hawaiiisch, Hebräisch, Hindi, Ungarisch, Isländisch, Indonesisch, Lettisch, Litauisch, Mazedonisch, Malaiisch, Norwegisch, Polnisch, Portugiesisch (Portugal), Portugiesisch (Brasilien), Rumänisch, Russisch, Serbisch (Kyrillisch/Lateinisch), Slowakisch, Schwedisch, Thailändisch, Tibetisch, Türkisch, Ukrainisch, Vietnamesisch
- Wörterbuchunterstützung (aktiviert Textvorhersage und automatische Korrektur) für Englisch (USA), Englisch (Großbritannien), Chinesisch (vereinfacht), Chinesisch (traditionell), Französisch (Frankreich), Französisch (Kanada), Französisch (Schweiz), Deutsch, Italienisch, Japanisch (Romaji, Kana), Koreanisch, Spanisch, Arabisch, Katalanisch, Cherokee, Kroatisch, Tschechisch, Dänisch, Niederländisch, Estnisch, Finnisch, Flämisch, Griechisch, Hawaiiisch, Hebräisch, Hindi, Ungarisch, Indonesisch, Lettisch, Litauisch, Malaiisch, Norwegisch, Polnisch, Portugiesisch (Portugal), Portugiesisch (Brasilien), Rumänisch, Russisch, Slowakisch, Schwedisch, Thailändisch, Türkisch, Ukrainisch, Vietnamesisch

Bedienungshilfen

- VoiceOver Bildschirmlesetechnologie

- Unterstützung für die Wiedergabe von Inhalten mit erweiterten Untertiteln
- AssistiveTouch Oberfläche für adaptives Zubehör
- Bildschirmfüllender Zoom
- Große Schriften
- Anzeigeeoption Weiß-auf-Schwarz
- Lautstärkeanpassung links/rechts

Umgebungsbedingungen

- Betriebsumgebungstemperatur: 0 °C bis 35 °C
- Lagertemperatur: –20 °C bis 45 °C
- Relative Luftfeuchtigkeit: 5 % bis 95 %, nicht kondensierend

Systemvoraussetzungen

- Apple ID (für einige Funktionen erforderlich)
- Internetzugang
- Synchronisierung mit iTunes auf einem Mac oder PC erfordert:
 - Mac: OS X 10.5.8 oder neuer
 - PC: Windows 7, Windows Vista oder Windows XP Home oder Professional mit Service Pack 3 oder neuer
 - iTunes 10.5 oder neuer

Lieferumfang

- iPad
- Dock Connector auf USB Kabel
- 10W USB Power Adapter (Netzteil)

Integrierte Apps

- Safari
- Fotos
- App Store
- Karten
- Photo Booth
- Erinnerungen
- Kamera
- Mail
- FaceTime
- iTunes
- Musik
- Uhr
- Kalender
- Nachrichten
- Zeitungskiosk
- Videos
- Game Center
- Kontakte
- Notizen

Anhang 3**Berechnung des Cohen´s-Kappa**

Tab. 1: Berechnung Kappa – alle Nutzer

	Kappa	p-Wert
2	0.774	<0.001
3	0.880	<0.001
4	0.497	<0.001
5	0.975	<0.001
6	0.665	<0.001
7	0.924	<0.001
8	0.815	<0.001
9	0.671	<0.001
10	0.895	<0.001
Tafel 11	0.880	<0.001
12	0.449	<0.001
13	0.783	<0.001
14	1.000	<0.001
15	0.412	<0.001
16	0.667	<0.001
17	0.868	<0.001
18	0.740	<0.001
19	0.542	<0.001

Tab. 2: Berechnung Kappa – Farbfehlsichtige, n.b.: nicht berechenbar

	Kappa	p-Wert
2	1.000	<0.001
3	0.824	<0.001
4	0.355	0.106
5	1.000	<0.001
6	0.580	0.001
7	0.735	<0.001
8	0.762	0.005
9	0.110	0.327
10	0.725	<0.001
Tafel 11	0.444	0.025
12	0.486	0.001
13	0.667	<0.001
14	1.000	<0.001
15	n.b.	
16	n.b.	
17	0.769	<0.001
18	0.390	0.024
19	0.674	<0.001

Tab.3: Berechnung Kappa – Farbnormale, n.b.: nicht berechenbar

	Kappa	p-Wert
2	0.703	<0.001
3	n.b.	
4	0.431	<0.001
5	0.955	<0.001
6	0.533	<0.001
7	0.955	<0.001
8	n.b.	
9	0.699	0.327
10	n.b.	
Tafel 11	0.871	<0.001
12	0.321	0.001
13	n.b.	
14	n.b.	
15	0.408	<0.001
16	0.073	0.324
17	0.661	0.001
18	0.659	<0.001
19	0.451	<0.001

Tab. 4: Berechnung Kappa – Buch vs. iPad1®, n.b.: nicht berechenbar

	Kappa	p-Wert
2	0.848	<0.001
3	0.474	0.002
4	0.302	0.005
5	1.000	<0.001
6	0.714	<0.001
7	1.000	<0.001
8	0.630	0.005
9	1.000	<0.001
10	1.000	<0.001
Tafel 11	0.825	0.001
12	0.474	0.001
13	n.b.	
14	n.b.	
15	1.000	0.002
16	0.630	0.005
17	1.000	0.002
18	1.000	0.002
19	0.512	<0.001

Tab.5: Berechnung Kappa-iPad1 ®vs. iPad2®, n.b.: nicht berechenbar

	Kappa	p-Wert
2	0.091	0.311
3	n.b.	
4	0.333	0.001
5	0.167	0.035
6	1.000	<0.001
7	0.167	0.035
8	0.630	0.005
9	0.167	0.035
10	1.000	<0.001
Tafel 11	0.167	0.035
12	n.b.	
13	n.b.	
14	n.b.	
15	1.000	<0.001
16	0.630	0.005
17	0.630	0.005
18	1.000	<0.001
19	0.383	0.008