

Achim Proß

Entwicklung einer Methode der Displaybeleuchtung zur Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems



SCHRIFTENREIHE ZU ARBEITSWISSENSCHAFT UND TECHNOLOGIEMANAGEMENT

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dieter Spath

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e. h. mult. Dr. h. c. mult. Hans-Jörg Bullinger

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT
der Universität Stuttgart, Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart

Band 47

Achim Proß

Entwicklung einer Methode der Displaybeleuchtung
zur Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems

Impressum

Kontaktadresse:

*Institut für Arbeitswissenschaft
und Technologiemanagement IAT
der Universität Stuttgart und
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-01, Fax -2299
www.iat.uni-stuttgart.de
www.iao.fraunhofer.de*

*Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft
und Technologiemanagement*

Herausgeber:

*Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dieter Spath
Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e. h. mult.
Dr. h. c. mult. Hans-Jörg Bullinger*

*Institut für Arbeitswissenschaft
und Technologiemanagement IAT
der Universität Stuttgart und
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO*

Bibliografische Information der

*Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet
diese Publikation in der Deutschen National-
bibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über www.dnb.de abrufbar.*

ISSN 2195-3414

ISBN 978-3-8396-1496-9

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2019

Druck und Weiterverarbeitung:

*IRB Mediendienstleistungen
Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB, Stuttgart*

*Für den Druck des Buchs wurde chlor-
und säurefreies Papier verwendet.*

© FRAUNHOFER VERLAG, 2019

*Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB
Postfach 800469, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-2500, Fax -2508
verlag@fraunhofer.de
<http://verlag.fraunhofer.de>*

Alle Rechte vorbehalten

*Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile ur-
heberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über
die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hi-
nausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Ver-
lages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere
für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfil-
mungen sowie die Speicherung in elektronischen
Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnun-
gen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt
nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen
im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-
Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und des-
halb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit
in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze,
Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI) Bezug
genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann
der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständig-
keit oder Aktualität übernehmen.*

Geleitwort

Grundlage der Arbeiten am Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart und am kooperierenden Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO ist die Überzeugung, dass unternehmerischer Erfolg in Zeiten globalen Wettbewerbs vor allem bedeutet, neue technologische Potenziale nutzbringend einzusetzen. Deren erfolgreicher Einsatz wird vor allem durch die Fähigkeit bestimmt, kunden- und mitarbeiterorientiert Technologien schneller als die Mitbewerber zu entwickeln und anzuwenden. Dabei müssen gleichzeitig innovative und anthropozentrische Konzepte der Arbeitsorganisation zum Einsatz kommen. Die systematische Gestaltung wird also erst durch die Bündelung von Management- und Technologiekompetenz ermöglicht. Dabei wird durch eine ganzheitliche Betrachtung der Forschungs- und Entwicklungsthemen gewährleistet, dass wirtschaftlicher Erfolg, Mitarbeiterinteressen und gesellschaftliche Auswirkungen immer gleichwertig berücksichtigt werden.

Die im Rahmen der Forschungsarbeiten an den Instituten entstandenen Dissertationen werden in der »Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement« veröffentlicht. Die Schriftenreihe ersetzt die Reihe »IPA-IAO Forschung und Praxis«, herausgegeben von H. J. Warnecke, H.-J. Bullinger, E. Westkämper und D. Spath. In dieser Reihe sind in den vergangenen Jahren über 500 Dissertationen erschienen. Die Herausgeber wünschen den Autoren, dass ihre Dissertationen aus den Bereichen Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement in der breiten Fachwelt als wichtige und maßgebliche Beiträge wahrgenommen werden und so den Wissensstand auf ein neues Niveau heben.



Dieter Spath



Hans-Jörg Bullinger

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter für das Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart und das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO.

An erster Stelle möchte ich der Privaten Stiftung Ewald Marquardt herzlich danken. Ohne ihre Förderung wäre die Realisierung dieser Arbeit niemals möglich gewesen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Leiter des IAT der Universität Stuttgart, danke ich für die Annahme dieser Arbeit und die wissenschaftliche Betreuung. Herrn Professor Dr.-Ing. Martin Schmauder von der Technischen Universität Dresden danke ich für die Übernahme des Mitberichts. Herrn Prof. Dr. Karlheinz Blankenbach von der Hochschule Pforzheim gilt mein Dank für den fachlichen Dialog und die Übernahme des zweiten Mitberichts.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bullinger und Dr.-Ing. Stephan Wilhelm gilt mein spezieller Dank für die Empfehlung dieser Arbeit zur Förderung bei der Stiftung.

Mein Dank geht an meine (ehemaligen) Kollegen am Fraunhofer IAO, u. a. Dr.-Ing. Matthias Bues, Dr.-Ing. Manfred Dangelmaier, die mir mit Diskussionen und kritischen Anmerkungen weiterhalfen. Vielen Dank an die zahlreichen Studenten für ihre Unterstützung.

Prof. Dr. Christian Cajochen, Dr.-Ing. Oliver Stefani und Isabel Schöllhorn vom Zentrum für Chronobiologie in Basel danke ich für viele Fachgespräche, die mir neue Perspektiven eröffneten.

Aus ganzem Herzen danke ich meiner Frau Julia, meinen Töchtern Lila und Flora für die Unterstützung, die Geduld und das Verständnis während der Entstehung dieser Arbeit. Vielen Dank an meine Familie, die mir über die lange Zeit auf dem Weg zur Promotion immer wieder Mut zusprach und mir Kraft schenkte.

Achim Proß

**Entwicklung einer Methode der Displaybeleuchtung
zur Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems**

**Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung**

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Achim Proß

aus Nagold

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder
2. Mitberichter: Prof. Dr. rer. biol. hum. Karlheinz Blankenbach

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Mai 2019

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT
der Universität Stuttgart

2019

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen	17
Zusammenfassung	22
Abstract	23
1 Einleitung	24
1.1 Ausgangssituation und Motivation	24
1.2 Zielsetzung	25
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	26
2 Stand der Forschung und Praxis	30
2.1 Lichttechnische Grundlagen	30
2.1.1 Radiometrische und photometrische Einheiten	31
2.1.2 Begrifflichkeiten der Farbmeterik	31
2.1.3 Beschreibung der Farbmeterik in der linearen Algebra	32
2.1.4 Beschreibung von Lichtquellen	33
2.2 Das Farbsehen beim Menschen	35
2.2.1 Aufbau des menschlichen Auges	35
2.2.2 Wahrnehmung von Farben	38
2.2.3 Metamerie	42
2.3 Farbmodelle	44
2.3.1 CIE-Normvalenzsystem	45
2.3.2 CIE-1976 UCS-System	46
2.3.3 Wahrnehmbarer Farbunterschied	48
2.4 Displaytechnik	49
2.4.1 Farbmodelle und Gamut	51
2.4.2 Charakterisierung von Displays	53
2.4.3 Berechnung der Gamut-Fläche	56

2.4.4	Farbwahrnehmung in Displays	56
2.4.5	Displays mit mehreren Primärfarben	57
2.4.6	Metamerie in Displays	58
2.4.7	Displays mit gezielter Steuerung des Blaulichtanteils	59
2.4.8	Displays mit variablem Farbspektrum	60
2.5	Nicht-visuelle Wirkung von Licht auf den Menschen	62
2.5.1	Zirkadianer Rhythmus	63
2.5.2	Kategorisierung in Chronotypen	67
2.5.3	Aktivierung durch Licht	67
2.5.4	Nicht-visuelle Wirkung künstlicher Beleuchtung in Innenräumen	68
2.5.5	Bewertungsmethoden der nicht-visuellen Lichtwirkung	69
2.5.6	Nicht-visuelle Wirkung von Displaylicht	76
2.6	Schädigung durch blaues Licht	83
2.6.1	Vorgaben und Grenzwerte	85
2.6.2	Schädigung durch blaues Licht in Displays	87
2.7	Fazit und Defizite der Forschung und Praxis	88
3	Forschungsfragen und experimentelles Vorgehen	90
3.1	Experiment 1: Nicht-visuelle Bewertungsmethoden für Displays	91
3.1.1	Auswahl der nicht-visuellen Bewertungsmethode für Displays	91
3.1.2	Diskussion der nicht-visuellen Bewertung von Displaysystemen	94
3.2	Experiment 2: Farbraum und nicht-visuelle Lichtwirkung bei Blaulichtreduzierung	95
3.2.1	Methode und Versuchsaufbau	95
3.2.2	Ergebnisse der Messungen	97
3.2.3	Diskussion der Ergebnisse	100
3.3	Experiment 3: Nicht-visuelle Lichtwirkung von Displays in Büroumgebungen . .	102
3.3.1	Methode und Versuchsaufbau	103
3.3.2	Ergebnisse der Messungen	104
3.3.3	Diskussion der Ergebnisse	106
3.4	Experiment 4: Schädigung durch blaues Licht von Displays	108
3.4.1	Methode und Versuchsaufbau	108
3.4.2	Ergebnisse der Messungen	109
3.4.3	Diskussion der Ergebnisse	110
3.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	111
4	Lösungsansatz und Methodenentwicklung	114
4.1	Anforderungen an die Methode und Lösungsansatz	114
4.2	Methode zur Displaybeleuchtung	119

4.3	Realisierung des Displayprototyps	121
4.3.1	Auswahl der technischen Komponenten	121
4.3.2	Simulation der Displayhintergrundbeleuchtung	126
4.3.3	Konstruktion des CwD-Prototyps	128
4.3.4	Optische Vermessung des Displayprototyps	130
5	Evaluierung der Methode	135
5.1	Untersuchung der Farbwahrnehmung bei variablem Farbspektrum	135
5.1.1	Methode und Versuchsaufbau	136
5.1.2	Test auf Reproduzierbarkeit	143
5.1.3	Ergebnisse der Farbwahrnehmungsuntersuchung	144
5.1.4	Diskussion der Ergebnisse der Farbwahrnehmung	147
5.2	Wahrgenommene Bildqualität bei variablem Spektrum	150
5.2.1	Methode und Versuchsaufbau	150
5.2.2	Ergebnisse der wahrgenommenen Bildqualität	158
5.2.3	Diskussion zur wahrgenommene Bildqualität	159
5.3	Nicht-visuelle Lichtwirkung des Displayprototyps	161
5.3.1	Ergebnisse der nicht-visuellen Lichtwirkung	161
5.3.2	Diskussion zur nicht-visuellen Lichtwirkung des CwD	161
5.4	Ergebnisse der Evaluierung	163
6	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	165
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	165
6.2	Grenzen der Arbeit	167
6.3	Schlussfolgerungen	168
6.4	Ausblick	169
6.4.1	Umsetzung in die Praxis	170
6.4.2	Zukünftige Forschungsthemen	170
A	Anhang: Grundlagen	172
A.1	Wahrnehmung und Farben	172
A.1.1	Graßmannsche Gesetze der Farbenlehre	172
A.1.2	Wahrnehmbarer Farbunterschied	173
A.1.3	Farbwiedergabe	174
A.2	Nicht-visuelle Bewertungsmethoden	174
A.2.1	Beispiel spektraler Beleuchtungsmessung	174
A.2.2	Ergänzungen zu Circadian Light und Circadian Stimulus	175
A.3	Schädigung durch blaues Licht	176
A.4	„Silent Substitution“ Methode	177

B Anhang: Charakterisierung von Displaysystemen	179
B.1 Beziehung der Farbkoordinaten und der CIE-Farbmetrik	179
B.1.1 Numerisches Modell	179
B.2 Charakterisierung des Displayprototyps zur Farbwahrnehmungsuntersuchung . .	181
B.2.1 Charakterisierung des Tagmodus	181
B.2.2 Charakterisierung des Nachtmodus	181
B.2.3 Testfarben der Farbwahrnehmungsuntersuchung	182
B.2.4 Testfarben und Ergebnisse der Retest-Reliabilität	184
C Anhang: Messsysteme	186
C.1 Messgeräte	186
C.1.1 Gigahertz-Optik BTS256-LED	186
C.1.2 Gigahertz-Optik X1-3	188
C.1.3 Konica Minolta CS-2000A	188
C.1.4 LMK mobile advanced	189
C.2 Messung der Beleuchtungsstärke am Auge	190
D Anhang: Bildnachweise	192
D.1 Testbilder der Evaluierung: Farbwahrnehmung	192
D.2 Testbilder der Evaluierung: Bildqualität	193
Literaturverzeichnis	194

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit	29
2.1	Aufbau des Auges und Verteilung der Photorezeptoren	36
2.2	Photosensitiven Rezeptoren im Auge	36
2.3	Spektrale Empfindlichkeit der L-, M- und S-Zapfen	37
2.4	Verschaltung der Rezeptoren und Gegenfarbkanäle	39
2.5	Farbempfindlichkeitskurven des CIE 1931 Standardbeobachter	39
2.6	Empfindlichkeitskurven der drei Farbrezeptoren X , Y und Z	41
2.7	CIE-1931 Farbraum und CIE-1976 Farbraum	48
2.8	Aufbau eines LCP	50
2.9	Aufbau eines LCDs	50
2.10	Normalisierter RGB-Farbraum	52
2.11	Projektionssystem nach Patent WO 2010/072415 A1	61
2.12	Wirkungsspektren nicht-visueller Bewertungsmethoden	71
2.13	Spektrale Gewichtungskurve für Gefährdungen der Netzhaut	86
3.1	Spektren und Melatoninkonzentration der IAO-UPK-Studie	92
3.2	Farbräume der gemessenen Büromonitore	99
3.3	Farbräume und Spektrum des iPad Air 2 mit „Night Shift Modus“	100
3.4	Einfluss der f.lux Software auf den Bildinhalt	101
3.5	Darstellung der Lichtquellen in Büroumgebungen	102
3.6	Ergebnisse der Messungen	105
3.7	Spektrale Bestrahlungsstärke am Auge	106
3.8	Blaulicht-gewichtete Strahlungsmessungen	110
4.1	Patentiertes Konzept des CwD	115
4.2	Farborte der Displaycharakterisierung	117
4.3	Charakterisierung der Primärfarben	118
4.4	Spektrale Bestrahlungsstärke der verwendeten LEDs	123
4.5	Farborte der verwendeten LEDs bei 500 mA Strom	123
4.6	Größe der Wanne der Hintergrundbeleuchtung	124
4.7	Visualisierung der ZEMAX Simulation der Displayhintergrundbeleuchtung	126
4.8	Homogenität der simulierten Ausleuchtung	127

4.9	Ergebnisse der Optimierungsfunktion bei 70 mm (a) und 83 mm (b) Abstand . . .	128
4.10	Konstruktion der Gehäusewanne	129
4.11	LEDs der BLU (a). Erster Displayprototyp (b)	129
4.12	Zweiter CwD-Prototyp	130
4.13	Leuchtdichteverteilung der BLU	131
4.14	Spektrum und Farbraum des CwD-Prototyps	133
4.15	Leuchtdichteverteilung des CwD-Prototyps	133
5.1	Geteiltes Hintergrundbeleuchtung des Prototyps	137
5.2	Gemessene Spektren und Darstellung des Farbraumes	138
5.3	Testfarben der Farbwahrnehmungsuntersuchung	139
5.4	Testbilder der Natürlichkeit	139
5.5	Kastengrafik aller Ergebnisse der Farbwahrnehmungsuntersuchung	146
5.6	Relative Häufigkeit der Antworten je Gruppe	146
5.7	Relative Häufigkeit der Antworten der fünf Testbilder	147
5.8	Spektrum des CwD (a) und Farbraum des CwD (b)	152
5.9	Spektrum des Eizo (a) und Farbraum des Eizo (b)	153
5.10	Testbilder zur Untersuchung der wahrgenommenen Bildqualität	154
5.11	Versuchsaufbau zur Bewertung der wahrgenommenen Bildqualität	155
5.12	Ergebnisse der Qualitätsbewertung der Szenarien (a) und der Displays (b) . . .	159
5.13	Ergebnisse der Sättigungsbewertung der Szenarien (a) und der Displays (b) . . .	159
5.14	Ergebnisse der Natürlichkeitsbewertung der Szenarien (a) und der Displays (b) .	160
6.1	Funktionsweise einer möglichen Farbanpassung mit ICC-Profilierung	171
A.1	Bewertung des „Circadian Light“ eines Schwarzkörpers	175
B.1	Gemessene Farborte der Testfarben im L*a*b* Farbraum	183
C.1	Auf 1 normierte winkelanhängige Charakteristik der Streuscheibe	187
C.2	Messaufbau der spektralen Beleuchtungsstärke	190
C.3	Messung der Beleuchtungsstärke abhängig vom Sehabstand	191

Tabellenverzeichnis

2.1	Strahlungsphysikalische und photometrische Größen und Einheiten	31
2.2	Farbtemperatur und Farbeindruck	34
2.3	Melanopische Wirkungsfaktoren verschiedener Lichtarten	74
2.4	Altersabhängige Transmissionsrate des Auges	84
2.5	Vergleich von Leuchtdichten verschiedener Lichtquellen	85
3.1	Gemessene Melatoninkonzentration zwischen 21:15 Uhr und 00:15 Uhr	92
3.2	Zirkadiane Bewertung der IAO-UPK-Studie	93
3.3	Ergebnisse Asus MX27AQ	97
3.4	Ergebnisse Fujitsu P27T-7	98
3.5	Ergebnisse Eizo EV2436W	98
3.6	Ergebnisse Samsung BX2240	98
3.7	Ergebnisse Apple iPad Air	99
3.8	Empfohlener Sehabstand für Bildschirmdiagonalen	103
3.9	Auflistung der Messszenarien	104
3.10	Anteile der Displaybeleuchtung am Auge	105
3.11	Einfluss von Displaylicht in Bürourgebungen	106
3.12	CIE empfohlene SI-konforme Bezeichnungen der Photorezeptoren	111
4.1	Auswahl der LEDs des Prototyps.	122
4.2	Abschätzung des Lichtstroms der LED-Hintergrundbeleuchtung	124
4.3	Photopische Messung des CwD-Prototyps	132
4.4	Farborte und Farbraum des CwD-Prototyps	132
5.1	Messung der Farbabstände	142
5.2	Klassifizierung und Gruppierung der Mediane zu den ΔE_{00} -Werten	143
5.3	Mediane der Ergebnisse für die Testfarben	145
5.4	Gemessene Farborte der Displays	152
5.5	Versuchsprotokoll Probandenstudie	156
5.6	Nicht-visuelle Bewertung des CwD-Prototyps	162
5.7	Nicht-visuelle Bewertung des Eizo EV2436W inklusive f.lux 3 400 K	162
5.8	Nicht-visuelle Bewertung des CwD-Prototyps mit Nachtmodus 430 nm	163

6.1	Vergleich der IAO-UPK-Studie von 2009 mit dem CwD-Prototyp	169
A.1	14 Testfarben nach DIN 6169	174
A.2	Klassifizierung von Lampen in Risikogruppen nach DIN EN 62471	176
A.3	Emissionsgrenzwerte der Risikogruppen nach DIN EN 62471	176
B.1	Farbwerte der charakterisierten oberen Displayhälfte nach DIN EN 61966-4 . . .	181
B.2	Farbwerte der charakterisierten unteren Displayhälfte nach DIN EN 61966-4 . .	181
B.3	RGB-Werte der Testfarben für die beiden Displayhälften	182
B.4	RGB-Werte der beiden Displayhälften für die Retest-Reliabilitätsmessung	184
B.5	Retest-Reliabilität Messdaten der beiden Probanden	185
C.1	Technische Daten des Gigahertz-Optik BTS256-LED	187
C.2	Technische Daten des Gigahertz-Optik X1-3	188
C.3	Technische Daten des Konica Minolta CS-2000A	188
C.4	Technische Daten des Technoteam LMK mobile advanced	189
D.1	Bildnachweise der ersten Probandenstudie	192
D.2	Bildnachweise der zweiten Probandenstudie	193

Abkürzungsverzeichnis und Formelzeichen

Abkürzungen

ANOVA	ANalysis Of VARiance (Varianzanalyse)
BEF	Brightness Enhancement Film (Helligkeitsverbesserungsfilm)
BLU	Back Light Unit (Hintergrundbeleuchtungseinheit)
CCFL	Cold Cathode Fluorescent Lamp (Kaltkathodenleuchtstofflampe)
CCT	Correlated Color Temperature (Ähnlichste Farbtemperatur)
CI	Konfidenzintervall
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Internationale Beleuchtungskommission)
CIE1931	CIE-Normfarbsystem nach DIN EN ISO 11664-1
CIELAB	CIE 1976 L*a*b*-Farbenraum nach DIN EN ISO 11664-4
CIELUV	CIE 1976 L*u*v*-Farbenraum nach DIN EN ISO 11664-5
CMYK	Abkürzung für die Farben Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz
CRI	Color Rendering Index (Farbwiedergabeindex)
CRT	Cathode Ray Tube (Kathodenstrahlröhre)
CVS	Computer Vision Syndrome
CwD	Circadian wirksames Display
DBEF	Dual Brightness Enhancement Film
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMX	Digital Multiplex (Digitales Steuerprotokoll basierend auf RS-485)
EEG	Elektroenzephalografie
ELD	Elektrolumineszenzdisplay
EOG	Elektrookulografie
ERG	Elektroretinogramm
FED	Field Emission Display (Feldemissionsdisplay)
FWHM	Full Width at Half Maximum (Halbwertsbreite)
GUI	Guided User Interface (Grafische Benutzeroberfläche)
IAO	Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
ICC	International Color Consortium
ipRGC	intrinsische photosensitive retinale Ganglienzellen

ISO	International Organization for Standardization
KSS	Karolinska Sleepiness Scale
KW	Kaltweiß
LC	Liquid Crystal (Flüssigkristall)
LCD	Liquid Crystal Display (Flüssigkristalldisplay)
LCP	Liquid Crystal Panel (Flüssigkristallpanel)
LED	Light-Emitting Diode (Licht emittierende Diode)
LUT	Lookup Table (Lookup-Tabelle oder Umsetzungstabelle)
MANOVA	Multivariate ANalysis Of VAriance (Multivariate Varianzanalyse)
MDEI	Melanopic Daylight-Equivalent Illuminance (Melanopische tageslicht-äquivalente Beleuchtungsstärke)
MPD	Multi Primary Display (Mehrfarbendisplay)
MSI	Melanopic Suppression Index (Melanopsin Suppressions-Index)
NW	Neutralweiß
OEF	Optical Enhancement Films (Optische Verbesserung-Schicht)
OLED	Organic Light-Emitting Diode (Organische Licht emitt. Diode)
OTF	Optical Transfer Function (Optische Übertragungsfunktion)
PDP	Plasma Display Panel (Plasmadisplay)
PMMA	Polymethylmethacrylat (Transparenter Kunststoff)
RGB	Abkürzung für die Farben Rot, Grün und Blau
RSE	Relative Spectral Effectiveness
SCN	Nucleus suprachiasmaticus
SEM	Slow Syc Movement
sRGB	Standard RGB-Farbraum
UPK	Universitäre Psychiatrische Kliniken Basel
VAS	Visuelle Analogskala
VIS	Sichtbare Strahlung (visible)
W	Weißpunkt
WW	Warmweiß

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung [Einheit Bezeichnung]
A	m^2	Flächeninhalt
$a_{c,v}$	-	Zirkadianer Wirkungsfaktor
$a_{mel,v}$	-	Melanopischer Wirkungsfaktor
$a_{mel,v,D65}$	-	Melanopischer Wirkungsfaktor des Normlichts D65
a^*	-	Koordinate (Abszisse) im CIEL [*] a^*b^* -Farbraum
b^*	-	Koordinate (Ordinate) im CIEL [*] a^*b^* -Farbraum
B^γ	-	Gamma korrigierter blauer Farbanteil
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
C	-	Farbstimulus der Tristimulus-Werte
CL_a	-	Circadian Light [<i>CircadianLux</i>]
CS	-	Circadian Stimulus
C_S	-	Kontrast
D_B	-	Digitale Eingangsdaten des blauen Bildinhaltes
D_G	-	Digitale Eingangsdaten des grünen Bildinhaltes
D_R	-	Digitale Eingangsdaten des roten Bildinhaltes
ΔE	-	Farbabstand
ΔE_{00}	-	Farbabstand CIEDE2000
ΔE_{94}	-	Farbabstand CIE 1994
$\Delta E_{L^*b^*a^*}$	-	Farbabstand CIELab
$\Delta E_{u'v'}$	-	Farbabstand ohne Helligkeit CIELu'v'
$\Delta u'v'$	-	Farbdifferenz
E_e	W/m^2	Bestrahlungsstärke
$E_{e,lc}$	W/m^2	Erythropische Bestrahlungsstärke
$E_{e,mc}$	W/m^2	Chloropische Bestrahlungsstärke
$E_{e,r}$	W/m^2	Rhodopische Bestrahlungsstärke
$E_{e,sc}$	W/m^2	Cyanopische Bestrahlungsstärke
$E_{e,z}$	W/m^2	Melanopische Bestrahlungsstärke
E_v	lx	Beleuchtungsstärke [<i>Lux</i>]
f	Hz	Frequenz [<i>Hertz</i>]
ϕ_e	W	Strahlungsfluss [<i>Watt</i>]
ϕ_v	lm	Lichtstrom [<i>Lumen</i>]
γ	-	Gammakorrektur
G^γ	-	Gamma korrigierter grüner Farbanteil
h	Js	Planck'sche Wirkungsquantums [<i>Joulesekunde</i>]
H_0	-	Nullhypothese
H_1	-	Alternativhypothese

Zeichen	Einheit	Bedeutung [Einheit Bezeichnung]
I_e	W/sr	Strahlungsstärke
I_F	A	Forward Current (Strom in Durchlassrichtung) [<i>Ampere</i>]
I_v	cd	Lichtstärke [<i>Candela</i>]
I_{Input}	-	Normierter Eingangspegel der digitale Eingangsdaten
I_{Output}	-	Normierter Eingangspegel der digitale Ausgangsdaten
λ	nm	Wellenlänge [<i>Nanometer</i>]
$K_{mel,D65}$	-	Melanopische Tageslicht-Äquivalent
L	m	Länge [<i>Meter</i>]
L	cm	Länge [<i>Zentimeter</i>]
L	nm	Länge [<i>Nanometer</i>]
L_B	W/m^2sr	Blaulicht-gewichtete Strahldichte nach DIN EN 62471
L_e	W/m^2sr	Strahldichte
L_v	cd/m^2	Leuchtdichte
L^*	-	Helligkeit im CIE $L^*a^*b^*$ -Farbraum
λ_d	nm	Dominante Wellenlänge
M_{ilm}	-	Spezieller Metamerieindex für die Änderung der Lichtart
M_{obs}	-	Spezieller Metamerieindex für die Änderung des Beobachters
N	-	Anzahl der Bits digitaler Daten
η	lm/W	Lichtausbeute
η_p^2	-	Eta-Quadrat (Effektstärke einer Varianzanalyse)
p	-	Signifikanzniveau / Überschreitungswahrscheinlichkeit
P	W	Leistung [<i>Watt</i>]
q	J	Energie der Lichtquanten [<i>Joule</i>]
Q_e	J	Strahlungsenergie [<i>Joule</i>]
Q_v	$lm\ s$	Lichtmenge [<i>Lumensekunde</i>]
R_a	-	Allgemeiner Farbwiedergabeindex
R_i	-	Spezieller Farbwiedergabeindex
R^γ	-	Gamma korrigierter roter Farbanteil
$s_{biol}(\lambda)$	-	Relative spektrale Strahlungsempfindlichkeit der biologischen Lichtwirkung nach DIN V 5031-100:2009-06
$s_{mel}(\lambda)$	-	Melanopisches Wirkungsspektrum nach DIN SPEC 5031-100:2015-08
T_f	K	Farbtemperatur [<i>Kelvin</i>]
$T_c(\lambda)$	K	Schwarzkörperkurve im CIE $u'v'$ -Farbraum
U	V	Elektrische Spannung [<i>Volt</i>]
u'	-	Koordinate (Abszisse) im CIE $u'v'$ -Farbraum
UR	%	Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung
v'	-	Koordinate (Ordinate) im CIE $u'v'$ -Farbraum

Zeichen	Einheit	Bedeutung [Einheit Bezeichnung]
V_{cc}	-	Visus mit Korrektur
$V(\lambda)$	-	Spektrale Hellempfindlichkeitskurve
Ω	<i>sr</i>	Raumwinkel [<i>Steradian</i>]
X	-	Tristimulus der roten Farbrezeptoren
X_B	-	X-Tristimulus bei Blau
X_G	-	X-Tristimulus bei Grün
X_R	-	X-Tristimulus bei Rot
X_{mel}	-	Melanopisch bewertete Strahlungsgröße
Y	-	Tristimulus der grünen Farbrezeptoren
Y_B	-	Y-Tristimulus bei Blau
Y_G	-	Y-Tristimulus bei Grün
Y_R	-	Y-Tristimulus bei Rot
Z	-	Tristimulus der blauen Farbrezeptoren
Z_B	-	Z-Tristimulus bei Blau
Z_G	-	Z-Tristimulus bei Grün
Z_R	-	Z-Tristimulus bei Rot

Zusammenfassung

Licht beeinflusst die menschliche Physiologie. Besonders in der Nacht unterdrückt der Blauanteil im Lichtspektrum die Produktion des Hormons Melatonin, was gravierende gesundheitliche Probleme verursachen kann. Displays mit LED-Beleuchtung, deren Lichtspektrum einen großen Anteil an Blaulicht beinhalten, wirken nachweislich negativ auf den menschlichen Tag-Nacht-Rhythmus und die Schlafqualität.

Die vorliegende Arbeit behandelt die kombinierte Fragestellung, wie spektrale Veränderungen der Displaybeleuchtung die nicht-visuelle Lichtwirkung und die Farbwahrnehmung des Menschen beeinflussen. In dieser Arbeit wird eine Methode zur Displaybeleuchtung auf Basis der aktuellen Forschung und dem Patent des zirkadian wirksamen Displays (CwD) entwickelt. Durch Verschiebung der Peak-Wellenlängen der Display-Primärfarben werden ein Tagmodus und ein Nachtmodus erzeugt, die jeweils das menschliche zirkadiane System unterstützen. Die Methode des metameren Weißpunktes wird anschließend als Büromonitor prototypisch realisiert und in zwei Probandenstudien evaluiert.

Die Ergebnisse der subjektiven Bewertung der Bildqualität zeigen: Mit der Methode des metameren Weißpunktes wird kein signifikanter Unterschied zwischen dem Tag- und dem Nachtmodus wahrgenommen. Im Vergleich dazu wird aber mit der Methode der Blaulichtreduzierung ein Unterschied signifikant wahrgenommen.

Mit einer Farbtemperatur des Displays von etwa $6\,500\text{ K}$ im Nachtmodus entspricht der zirkadiane Wirkungsfaktor mit der Methode des metameren Weißpunktes dem einer weißen LED mit $4\,200\text{ K}$. Im Tagmodus, mit ebenfalls $6\,500\text{ K}$, ist der zirkadiane Wirkungsfaktor des Displays größer als der Wirkungsfaktor des Tageslichts und entspricht einer weißen LED mit $8\,000\text{ K}$.

Abstract

Development of a method for display lighting supporting the human circadian system

Light has an influence on human physiology. Especially at night, the blue part of the light spectrum suppresses the production of the hormone melatonin, which can result in serious health problems. Displays with LED backlighting, whose light spectrum contains a large amount of blue light, have a proven negative effect on the human day-night rhythm and sleep quality.

This paper discusses the combined question of how spectral changes in display lighting affect non-visual light effects and human color perception. In this thesis, a method for display lighting based on current research and the patent of the circadian effective display (CwD) is developed. By shifting the peak wavelengths of the display's primary colors, a day mode and a night mode are generated, each supporting the human circadian system. The method of metameric white point is then implemented as a prototype office monitor and evaluated in two studies with probands.

Results of the subjective evaluation of image quality shows: With the metameric white point method, no significant difference between day and night mode is observed. In comparison, however, a difference is observed significantly with the blue light reduction method.

With a display color temperature of about $6\,500\text{ K}$ in night mode, the circadian factor of metameric white point method corresponds to that of a white LED with $4\,200\text{ K}$. In day mode, also at $6\,500\text{ K}$, the circadian factor of the display is larger than the factor of the daylight and corresponds to a white LED at $8\,000\text{ K}$.

1 Einleitung

Das menschliche Auge liefert über 70% der Informationen, die wir aus unserer Umwelt erhalten (Frings und Müller 2014). Das menschliche Gehirn empfängt das über die Augen aufgenommene Licht auf unterschiedliche Weise. Das Sehen wird im visuellen Cortex, die Emotionen im limbischen System und die nicht-visuelle beziehungsweise zirkadiane Lichtwirkung im Hypothalamus verarbeitet (Frings und Müller 2014; Kramer und Merrow 2013; Tosini et al. 2014). Nicht-visuelle Wirkungen des Lichts, die über das Auge empfangen werden, beeinflussen nachweislich die kognitive Leistung, Gesundheit, Physiologie, Psychologie und den Tag-Nacht-Rhythmus (Birren 1961; Cajochen 2007; Vandewalle et al. 2013; Viola et al. 2008). Die Vergabe des „Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 2017“ an J. C. Hall, M. Rosbash und M. W. Young „für ihre Entdeckungen betreffend die molekularen Kontrollmechanismen des circadianen Rhythmus“ ist ein Beleg für die Aktualität des Themas (Schwedische Akademie 2017).

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Das Competence Team Visual Technologies des Fraunhofer IAO konnte gemeinsam mit dem Zentrum für Chronobiologie der UPK Basel nachweisen, dass LED-beleuchtete Monitore die Melatoninkonzentration und daraus folgend die Müdigkeit der Betrachter stärker unterdrücken als solche mit Kaltkathodenröhren-Hintergrundbeleuchtung (Cajochen et al. 2011; Stefani et al. 2010b). Displays mit LED-Beleuchtung emittieren blaues Licht im Wellenlängenbereich zwischen 450 und 490 *nm*. Dieser Anteil des Lichtspektrums ähnelt sehr dem Empfindlichkeitsspektrum der Melanopsinempfänger im menschlichen Auge (Brainard et al. 2001; Thapan et al. 2001). Der in der Netzhaut des Auges liegende Photorezeptor Melanopsin steuert die Produktion des Hormons Melatonin (Provencio et al. 2000). Melatonin steuert beim Menschen den natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus und ist für den Schlaf mitverantwortlich (Cajochen 2009). In der Nacht unterdrückt künstliche Beleuchtung, die Anteile des genannten blauen Wellenlängenbereichs beinhaltet, die Produktion von Melatonin, was gravierende gesundheitliche Folgen haben kann: erhöhtes Krebsrisiko, Schlafstörungen, Konzentrationsstörungen und Depressionen (Blask 2009; Chellappa et al. 2013; Stevens 2006; Wirz-Justice und Roenneberg 2013).

Im Jahr 2017 waren allein in Deutschland 34,1 Millionen Arbeitsplatzcomputer vorhanden (Bordestep Institut 2018). Jedes Jahr steigt die durchschnittliche Größe der Computermonitore und die Anzahl der Monitore an einem Arbeitsplatz (Haner et al. 2009). Im Jahr 2013 lag der Anteil von Monitoren mit einer Diagonalen zwischen 22 und 24 Zoll bei 26 %. Für das Jahr 2018 wird ein Marktanteil dieser Monitorgröße von 33 % erwartet (IHS Technologie 2015). Nicht nur bei der Wissensarbeit, sondern auch in der industriellen Produktion, in der teilweise 24 Stunden gearbeitet wird, gibt es viele Bildschirmarbeitsplätze. Hochrechnungen schätzen die Anzahl von Bildschirmarbeitsplätzen in der Produktion in Deutschland auf 2,5 Million (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2011). Flexible Arbeitszeiten und die Vereinbarkeit von Familie und Beruf sind ausschlaggebend bei der Wahl des Arbeitgebers. In vielen Bereichen erstreckt sich die Arbeitszeit über den gesamten Tag. Dass in Zukunft in den Abendstunden, kurz vor dem Schlafengehen, vor einem Display gearbeitet wird, ist ein immer wahrscheinlicher werdendes Szenario (Eichhorst und Tobsch 2014; Rief et al. 2015). Am Abend und in der Nacht steigt zudem die private Nutzung elektronischer Displays. Bei einer Umfrage unter 2 325 Personen gaben 25 Prozent an, dass sie elektronische Bücher (E-Books) lesen (Berg 2015).

Die Relevanz des Themas ergibt sich auch aus der Konvergenz von Display- und Beleuchtungstechnologie (Bues et al. 2016). Displays dienen primär dem Informationstransport. Darüber hinaus ist der Anteil der Displaybeleuchtung Teil der Gesamtbeleuchtung eines Raumes. Das ausgestrahlte Licht von Displays hat einen physiologisch messbaren Einfluss auf den Menschen. Von besonderer Bedeutung ist folglich ein integrativer Ansatz, also eine ganzheitliche Betrachtung der drei Eigenschaften von Displays: Informationstransport, Beleuchtung und Wirkung des Lichts auf den Menschen.

1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit behandelt die kombinierte Fragestellung, welche Einflüsse spektrale Veränderungen der Displaybeleuchtung auf die nicht-visuellen Lichtwirkungen und Farbwahrnehmung beim Menschen haben. In dieser Arbeit wird eine Methode zur Displaybeleuchtung mit folgenden Anforderungen an die spektrale Zusammensetzung des Lichts und den wahrgenommenen Farbraum entwickelt und experimentell erprobt:

- Spektrale Verschiebung der Primärfarben von Displaysystemen mit minimalem Einfluss auf die Farbwahrnehmung.
- Maximale und minimale Anregung des nicht-visuellen Systems durch spektrale Veränderung der Displayhinterleuchtung.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Displaybeleuchtung, die prototypisch realisiert und evaluiert wird. Die Methode zur Displaybeleuchtung soll die zirkadianen Einflüsse von Displays auf den Menschen minimieren, besonders die negativen Einflüsse der Displaybeleuchtung auf die Melatoninunterdrückung und die Schlafqualität. Der Farbeindruck der Bildinhalte soll dabei möglichst identisch wahrgenommen werden.

Notwendige Teilziele zur Realisierung des Vorhabens sind:

- Beschreibung der Wirkmechanismen der blauen Lichtanteile in Displays.
- Analyse und Auswahl nicht-visueller Bewertungsmethoden mit Anwendung auf Displays.
- Beschreibung der Auswirkungen spektraler Veränderungen auf den dargestellten Farbraum in Displays.

Die Begriff **Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems** wird in der vorliegenden Arbeit folgendermaßen verstanden: Der natürliche endogene (innere) Tag-Nacht-Rhythmus des Menschen beträgt etwa 24 Stunden (Kramer und Merrow 2013; Roenneberg et al. 2013). Dieser Rhythmus wird durch exogene (äußere) Einflüsse, beispielsweise dem Hell-Dunkel-Zyklus des Tageslichts, synchronisiert (Roenneberg et al. 2003a). Licht ist dabei der wichtigste Zeitgeber (Roenneberg et al. 2013). Die Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems bedeutet bezüglich des Lichts: hohe Beleuchtungsstärken mit hohem Blauanteil am Tag, ähnlich dem Tageslicht; kein bis wenig Licht beziehungsweise geringe Blauanteile in der Nacht zur Nachbildung des natürlichen Hell-Dunkel-Zyklus des Tageslichts. Eine De-Synchronisation des zirkadianen Systems soll durch eine unterstützende Beleuchtung vermieden werden (Duffy und Wright 2005; Roenneberg et al. 2003a, 2013; Wirz-Justice und Roenneberg 2013).

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit wird schematisch in Abbildung 1.1 gezeigt. Zunächst wird ein Überblick über die lichttechnischen Grundlagen, das menschliche Sehen und die Farbwahrnehmung, die Funktionsweise von Displaysystemen und die nicht-visuelle Wirkung von Licht auf den Menschen gegeben. Es werden die Defizite bestehender Methoden und Systeme zur Reduzierung der Blaulichtanteile in Displays aufgezeigt.

Auf Basis der Defizite des Stands der Forschung und Praxis werden die Forschungsfragen für diese Arbeit entwickelt. Vier Experimente werden vor der Entwicklung der Methode der Displaybeleuchtung durchgeführt. Sie dienen der Determination nicht-visueller Bewertungsmethoden und der Analyse und Bewertung bekannter Methoden zur Reduzierung des Blaulichtanteils in Displays.

Experiment 1 dient der Festlegung der in dieser Arbeit angewendeten nicht-visuellen Bewertungsmethode für Displaysysteme. Aus bekannten Verfahren nicht-visueller Bewertungsmethoden von Lichtquellen wird auf Grundlage eines von IAO und UPK durchgeführten Experimentes (Cajochen et al. 2011; Stefani et al. 2010b) die Übertragbarkeit auf Displaysysteme aufgezeigt.

Experiment 2 überprüft messtechnisch die im Stand der Forschung und Praxis aufgeführten Methoden zur Reduzierung der blauen Lichtanteile in Displays. Es werden die Defizite des darstellbaren Farbraumes und des Farbortes des Weißpunktes bei der Reduzierung der blauen Lichtanteile in Displays aufgezeigt.

Experiment 3 stellt die Displaybeleuchtung anteilig in das Verhältnis zur Allgemeinbeleuchtung und des Tageslichts. Es wird gezeigt, wie viel Licht in Büroumgebungen am Auge des Nutzers ankommt und welcher Anteil der nicht-visuellen Lichtwirkung auf Displaylicht zurückzuführen ist.

Experiment 4 untersucht die im Stand der Forschung und Praxis aufgeführten Methoden zur Reduzierung der blauen Lichtanteile in Displays hinsichtlich der photobiologischen Verträglichkeit, also auf mögliche Schädigungen der menschlichen Retina. Bezogen auf Emissionsgrenzwerte bekannter Normen werden handelsübliche Büromonitore optisch vermessen und die optische Sicherheit anhand deren Risikogruppen klassifiziert.

Aus der Zusammenfassung des Stands der Forschung und Praxis sowie den Ergebnissen der vorausgegangenen Experimente wird eine Methode zur Displaybeleuchtung entwickelt. Ziel der Methode der Displaybeleuchtung ist die Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems. Der darstellbare Farbraum und der Weißpunkt mit der Methode der Displaybeleuchtung soll dabei möglichst nicht wahrnehmbar verändert werden. Die Methode zur Displaybeleuchtung wird prototypisch als Büromonitor angewendet. Anschließend wird der Displayprototyp optisch vermessen.

Die Evaluierung der Methode der Displaybeleuchtung wird bezüglich der Farbwahrnehmung mithilfe des Displayprototyps mit zwei Probandenstudien durchgeführt. Die Wirkung des Lichts auf den Menschen wird mit der in Experiment 1 festgelegten nicht-visuellen Bewertungsmethode berechnet.

Probandenstudie 1 überprüft die Unterschiede in der subjektiven Farbwahrnehmung abhängig von den Farborten und dem Farbabstand. Den Probanden der Farbwahrnehmungsuntersuchung werden gleichzeitig zwei Testfarben dargeboten, die mit der entwickelten Methode erzeugt und auf dem Displayprototyp dargestellt werden. Die Displayhintergrundbeleuchtung ist durch eine Trennwand in zwei Bereiche unterteilt.

Probandenstudie 2 untersucht die wahrgenommene Bildqualität der entwickelten Methode im Vergleich zur Blaulichtreduzierung nach Experiment 2. Die wahrgenommene Bildqualität wird mit den Bewertungskriterien Qualität, Farbsättigung und Natürlichkeit der dargestellten Bildinhalte von den Probanden subjektiv bewertet. Die Natürlichkeit eines Bildinhaltes entspricht den eigenen Erwartungen an das dargestellte Bild (Fedorovskaya et al. 1997; Sakurai et al. 2008).

Abschließend werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und daraus Schlussfolgerungen gezogen. Es wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen zur nicht-visuellen Lichtwirkung von Displays gegeben. Der Ausblick zeigt sowohl weitere wissenschaftliche Untersuchungen als auch Ansatz zur Übertragung der entwickelten Methode in die praktische Anwendung.

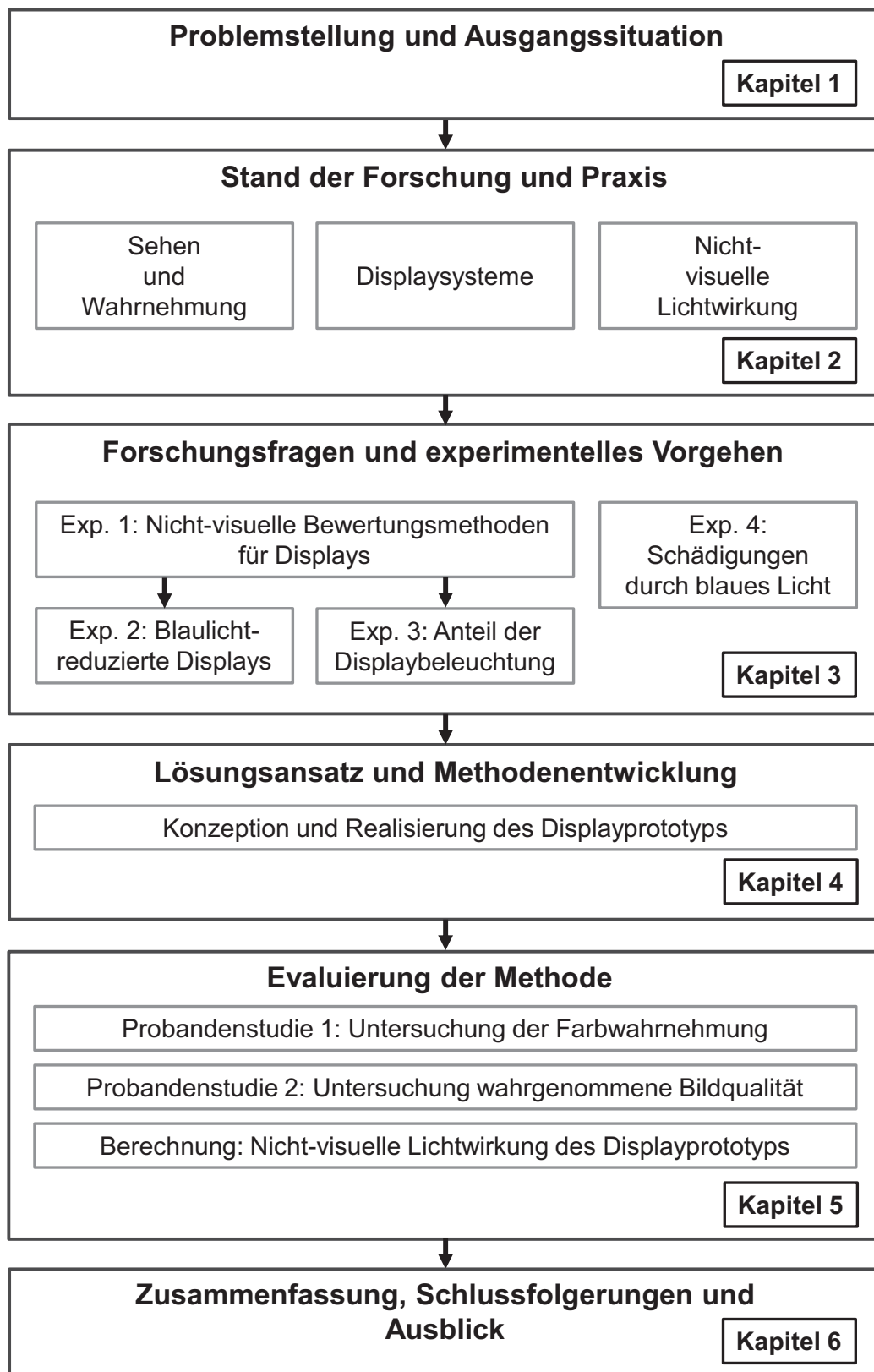


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Forschung und Praxis

In diesem Kapitel werden die relevanten Grundlagen zum Verständnis der Arbeit erläutert. Diese sind die lichttechnischen Grundlagen, das menschliche Sehen und die Farbwahrnehmung, die Funktionsweise von Displaysystemen und die nicht-visuelle Wirkung von Licht auf den Menschen. Es wird eine Zusammenfassung des Stands der Forschung und Praxis im Hinblick auf die nicht-visuelle Lichtwirkung von Displaysystemen und die Methoden zur Reduzierung der Blaulichtanteile in Displays aufgezeigt. Die Defizite dieser Methoden werden zusammengefasst.

2.1 Lichttechnische Grundlagen

„Als *Licht* bezeichnet man den Teil der elektromagnetischen Strahlung, der im Auge eine Hellempfindung hervorruft.“ (Baer 2006, S. 15)

Elektromagnetische Strahlung breitet sich als periodische Schwingung (elektromagnetische Welle) aus. Das Wechselwirkungsteilchen zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie ist das Lichtquant (Photon). Licht hat sowohl die Eigenschaft elektromagnetischer Wellen als auch die eines Teilchenstroms. Dieser Welle-Teilchen-Dualismus ist ein Erkenntnis der Quantenphysik (Tipler et al. 2015). Die Energie q der Lichtquanten oder Photonen wird entsprechend der Frequenz f oder der Wellenlänge λ und der Lichtgeschwindigkeit c nach der Einstein'schen Gleichung der Photonenenergie nach 2.1 berechnet (Tipler et al. 2015).

$$q = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Dabei ist $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ das Planck'sche Wirkungsquantum und $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ die Lichtgeschwindigkeit. Anhand Formel 2.1 zeigt sich: Je kleiner die Wellenlänge der Strahlung, desto größer ist die Energie der Photonen. Blaues Licht ist demzufolge energiereicher als grünes und rotes Licht.

Elektromagnetische Wellen werden anhand ihrer Wellenlänge unterteilt. Beispielsweise in Gammastrahlung, sichtbares Licht und Radiowellen. Als optische Strahlung wird der Bereich zwischen 100 nm und 1 mm bezeichnet. Die optische Strahlung umfasst die ultravioletten (UV),

Strahlungsphysikalische Größe	Einheit	Photometrische Größe	Einheit
Strahlungsfluss ϕ_e	W	Lichtstrom ϕ_v	$lm = cd \cdot sr$
Strahlungsenergie Q_e	$J = W \cdot s$	Lichtmenge Q_v	$lm \cdot s$
Strahlungsstärke I_e	W/sr	Lichtstärke I_v	$cd = lm/sr$
Bestrahlungsstärke E_e	W/m^2	Beleuchtungsstärke E_v	$lx = lm/m^2$
Strahldichte L_e	$W/(m^2 sr)$	Leuchtdichte L_v	cd/m^2

Tabelle 2.1: Strahlungsphysikalische und photometrische Größen und Einheiten

die für das menschliche Auge sichtbaren (VIS, Licht) und die infraroten (IR) Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums. UV-Strahlung wird unterteilt in UV-A-, UV-B- und UV-C-Strahlung zwischen den Wellenlängen 100 nm bis 380 nm . Das sichtbare Licht ist zwischen den Wellenlängen 400 nm bis 760 nm und infrarote Strahlung ist zwischen 760 nm bis zu einem Millimeter Wellenlänge (Tipler et al. 2015). Licht mit Wellenlängen um 420 nm wird als blaues Licht wahrgenommen. Licht mit einer Wellenlänge um 555 nm als Grün und Licht um 700 nm als Rot.

2.1.1 Radiometrische und photometrische Einheiten

Die Strahlungsphysik (Radiometrie) ist die physikalische Erfassung der elektromagnetischen Leistung; dies bedeutet die Messung einer betrachteten Strahlungsenergie pro Zeiteinheit. Die Photometrie dagegen beschreibt die Wirkung der elektromagnetischen Strahlungsleistung auf den visuellen Empfänger. Im Unterschied zur Radiometrie werden bei der Photometrie die Messungen mit der subjektiven Hellempfindlichkeitskurve des menschlichen Auges gewichtet. Die Photometrie ist die messtechnische Erfassung der physiologischen Farbwahrnehmung.

Tabelle 2.1 listet die strahlungsphysikalischen und photometrischen (lichttechnischen) Größen auf, die in dieser Arbeit verwendet werden. Zur Unterscheidung der strahlungsphysikalischen Größen von den photometrischen Größen werden die Indizes e (energetisch) für die Radiometrie und v (visuell) für die Photometrie verwendet.

2.1.2 Begrifflichkeiten der Farbmatrik

Farbmatrik beschreibt die Lehre der Maßbezeichnungen von Farben (Fairchild 2013). Ihre Aufgabe ist das Definieren eindeutiger Maßzahlen für die Beschreibung eines Farbeindrucks (Baer 2006).

Farbvalenz

Die **Farbvalenz** beschreibt die Wirkung des Lichts auf die farbbempfindlichen Sinneszellen im menschlichen Auge (Kapitel 2.2.2). Das Grundgesetz der Farbmeterik (Kapitel A.1.1) beruht auf der Bewertung der einfallenden Strahlung mit drei voneinander unabhängigen spektralen Wirkungsfunktionen (Baer 2006). Diese Dreidimensionalität ermöglicht, dass Farb Räume mit drei Koordinaten darstellbar sind. Zur Beschreibung der Farbwahrnehmung sind daraus ableitend drei Werte ausreichend. Die Farbvalenz ist eine objektiv messbare Eigenschaft des Lichts.

Farbreiz und Farbbempfindung

Der **Farbreiz** beschreibt die Reizung der Netzhaut durch sichtbare elektromagnetische Strahlung, die eine Farbwahrnehmung hervorruft (Kapitel 2.2.2). Hingegen ist die **Farbbempfindung** ein Sinnesindruck, der im Sehzentrum des Gehirns eines Beobachters die Wahrnehmung einer Farbe hervorruft.

Farbe, Farbsystem, Farbmodell, Farbkörper, Farbraum, Farbort und Farbwert

Der Begriff **Farbe** beschreibt die Farbvalenz in der Farbmeterik, die auf einem physikalischen Farbreiz beruht. Die systematische Anordnung von Farbvalenzen und das Grundprinzip der Farbmischung werden als **Farbsystem** bezeichnet. Ein abstraktes Farbsystem, das in einem mathematischen Raum beschrieben wird und eindeutigen Zahlenwerten zuzuschreiben ist, wird als **Farbmodell** bezeichnet. Der **Farbkörper** definiert das geometrisch darstellbare Farbmodell. Der **Farbraum** (Gamut) umfasst alle Farben, die in einem Farbmodell darstellbar sind. Der **Farbort** ist ein definierter Punkt im Farbkörper. Die Koordinaten des Farbortes beschreiben die Lage im Farbmodell. Der **Farbwert** ist der Absolutwert des Vektors zu einem Farbort (Bartenbach 2009; Richter 2011).

2.1.3 Beschreibung der Farbmeterik in der linearen Algebra

Stockman et al. beschreiben die spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfentypen¹ im menschlichen Auge als linear (Stockman und Brainard 2015; Stockman et al. 1993). Zur mathematischen Beschreibung der menschlichen Wahrnehmung wird die Notation der Matrixmultiplikation und

¹Eine detaillierte Beschreibung der Zapfentypen und des Aufbaus des menschlichen Auge findet sich in Kapitel 2.2.1.

der Vektorgeometrie verwendet (Wandell 1995). Die mathematische Beschreibung der Beziehungen zwischen Farbstimuli wird in Vektor- und Matrixnotation nach Gleichung 2.2 dargestellt (CIE 2004).

$$\mathbf{C} = X\mathbf{X} + Y\mathbf{Y} + Z\mathbf{Z} \quad (2.2)$$

Wobei \mathbf{C} der Farbstimulus der Tristimulus-Werte X, Y, Z ist und $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ die Einheitsvektoren des Referenzreizes sind. Detailliert beschrieben werden die Tristimulus-Werte in Kapitel 2.2.2 und der Zusammenhang zwischen Matrixnotation und numerischem Modell in Anhang B.1.1.

2.1.4 Beschreibung von Lichtquellen

Zur messtechnischen Erfassung von Lichtquellen und zur Beschreibung des ausgestrahlten Lichts und dessen Wahrnehmung, gibt es unterschiedliche Begrifflichkeiten und Einheiten. Im Folgenden werden diese erläutert.

Lichtfarbe

Die **Lichtfarbe** beschreibt die Farbe einer selbstleuchtenden Lichtquelle und wird mit der Farbtemperatur angegeben (Deutsches Institut für Normung e.V. 2017-10-01). Die Farbe eines Körpers, der Licht einer Lichtquelle reflektiert, wird dagegen als Körperfarbe bezeichnet (Deutsches Institut für Normung e.V. 2017-10-01). Die Lichtfarbe dient dem Vergleich von weißen Lichtquellen. Die Lichtfarbe kann durch Farbtemperatur, Farbort, Farbwiedergabeindex und Lichtart beschrieben werden (Buschendorf 1989).

Farbtemperatur

Die **Farbtemperatur** ist ein Maß, um den Farbeindruck einer Lichtquelle quantitativ zu messen. Die Farbtemperatur wird in Kelvin (K) angegeben und basiert auf der Farbe eines „schwarzen Strahlers“ (Planck'scher Strahler) bei der angegebenen Temperatur. Ein schwarzer Strahler ist eine theoretische idealisierte thermische Strahlungsquelle, die alles Licht absorbiert und somit keine Reflexionseigenschaften besitzt. Durch thermische Anregung strahlt ein schwarzer Strahler elektromagnetische Wellen im sichtbaren Bereich sowie Wärmestrahlung ab (Planck 1914). Die Energie eines schwarzen Strahlers steigt mit der Temperatur und die Wellenlängen verschieben sich hin zu kürzeren Wellenlängen (Fairchild 2013). Tabelle 2.2 zeigt die Eingruppierung von Lichtquellen anhand ihrer Farbtemperaturen und deren Farbeindruck (Baer 2006).

Bezeichnung	Farbtemperatur T_F	Farbeindruck
Kaltweiß (KW)	$> 5\,300\text{ K}$	kalt / tageslichtähnliches Licht
Neutralweiß (NW)	$3\,300\text{ K} - 5\,300\text{ K}$	neutral / weißes Licht
Warmweiß (WW)	$< 3\,300\text{ K}$	warm / gelbweißes Licht

Tabelle 2.2: Farbtemperatur und Farbeindruck

Farbwiedergabe

Zur messtechnischen Beschreibung der Reflexionseigenschaften eines Objektes wird die Farbwiedergabe verwendet. Die **Farbwiedergabe** beschreibt den Farbeindruck eines bestrahlten Objektes im Vergleich zum Farbeindruck des gleichen Objektes unter einer Bezugslichtquelle. Die Bezugslichtquelle bei Farbtemperaturen $\leq 5\,000\text{ K}$ ist die Strahlung eines schwarzen Strahlers. Bei höheren Farbtemperaturen wird die spektrale Verteilung des Tageslichts als Bezugslichtart gewählt (Baer 2006). Der allgemeine Farbwiedergabeindex R_a (Color Rendering Index, CRI) berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel des spektralen Reflexionsverhalten repräsentativer Körperfarben von acht Testfarben (Deutsches Institut für Normung e.V. 1976-01-01).

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (2.3)$$

Dabei ist R_i der spezielle Farbwiedergabeindex der Testfarbe i mit dem ermittelten Farbunterschied ΔE_i der Bezugslichtart zur gemessenen Lichtart (Baer 2006; Hunt 2004)

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad (2.4)$$

In den Normen DIN 6169 und CIE 13.3 werden 14 Testfarben festgelegt (CIE 1995; Deutsches Institut für Normung e.V. 1976-01-01). Die Beschreibung der Testfarben findet sich in Anhang A.1.3.

Lichtart

Die **Lichtart** ist die Benennung für Strahlung mit bestimmter relativer spektraler Verteilung in dem Spektralbereich, der die Farbe von Objekten beeinflusst (Deutsches Institut für Normung e.V. 2017-10-01). Die Lichtart beschreibt das charakteristische Spektrum eines Strahlers und wird mit einem Kurzzeichen angegeben. Beispielsweise **D** für Tageslicht oder **A** für eine Glühlampe. Bei Tageslicht wird die Farbtemperatur in K angefügt, beispielsweise steht die Normlichtart D65 für $6\,500\text{ K}$ (Deutsches Institut für Normung e.V. 2014-10-01a).

2.2 Das Farbsehen beim Menschen

Das Sehen von Farben spielt bei der Wahrnehmung eine wichtige Rolle. Die Evolution des Farbsehens hat sich beim Menschen aufgrund von biologischen Vorteilen entwickelt (Frings und Müller 2014). Beispielsweise kann er durch die Farbe von Früchten bereits aus weiter Entfernung deren Reifegrad und Genießbarkeit erkennen. Wichtig ist vor allem die Fähigkeit von Menschen zwischen Rot und Grün zu unterscheiden. Die meisten Säugetiere können hingegen nur Blau und Grün sehen. Sie sind sogenannte Dichromaten (Frings und Müller 2014). Lebewesen, die drei verschiedene Arten von Zapfen als Farbrezeptoren in der Netzhaut haben, werden als Trichromaten bezeichnet (Frings und Müller 2014).

2.2.1 Aufbau des menschlichen Auges

Das menschliche Auge besitzt zwei Arten von Sinneszellen, die das Sehen ermöglichen: Stäbchen für das Sehen in der Nacht (skotopisches Sehen) und Zapfen für das Sehen am Tag (photopisches Sehen) und zur Farbwahrnehmung. Der Übergang zwischen dem Tag- und Nachtsehen wird als mesopisches Sehen bezeichnet, dabei sind Stäbchen und Zapfen gleichzeitig aktiv. Stäbchen dienen dem Sehen bei niedrigen Leuchtdichten ($< 1 \text{ cd/m}^2$). Bei Leuchtdichten über 100 cd/m^2 sind Stäbchen gesättigt. Dann sind nur Zapfen am Sehprozess beteiligt (Fairchild 2013). Sechs Millionen Zapfen und ca. 120 Millionen Stäbchen gibt es in der Retina. Diese sind nicht gleichmäßig verteilt (Abbildung 2.1(b)). In der Fovea, dem Zentrum der Retina, ist die Zapfendichte mit ca. 140 000 Zapfen pro mm^2 am höchsten. In der Fovea liegt die Stelle des schärfsten Sehens (Frings und Müller 2014). Die Stäbchen sind peripher in der Fovea angeordnet und weisen eine deutlich höhere Rezeptordichte auf. Abbildung 2.1(b) zeigt die Verteilung der Rezeptoren, aufgetragen über den Sehwinkel. Das Gesichtsfeld, der gesamte Sehwinkel des Sichtfeldes, beschreibt den visuellen Wahrnehmungsbereich bei unbewegtem Kopf und unbewegten Augen (Schmauder und Spanner-Ulmer 2014). Das Gesichtsfeld beträgt ca. 120° . Auf die Stelle des schärfsten Sehens, die Fovea, entfällt etwa 1° des Sehwinkels.

Drei Arten von Zapfen werden anhand ihrer spektralen Empfindlichkeit unterschieden: Long-, Mittel- und Short-Zapfen (L-, M- und S-Zapfen). Abbildung 2.2 zeigt die Lage der photosensitiven Rezeptoren im Auge. Die relative Häufigkeit der unterschiedlichen Zapfen L:M:S ist 40:20:1 (Fairchild 2013). S-Zapfen haben ihre maximale Empfindlichkeit im kurzwelligen blauen Bereich des sichtbaren Lichtspektrums bei etwa $420\text{-}450 \text{ nm}$; M-Zapfen im mittleren Wellenlängenbereich bei $534\text{-}545 \text{ nm}$ und L-Zapfen im langwelligen gelben Bereich bei $564\text{-}580 \text{ nm}$ (Garhart und Lakshminarayanan 2016). Die Empfindlichkeitskurve der Zapfen ist definiert durch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon einer bestimmten Wellenlänge absorbiert wird. Abbildung 2.3(a) zeigt die Empfindlichkeitsbereiche der Rezeptoren. Die Empfindlichkeitsbereiche der L-,

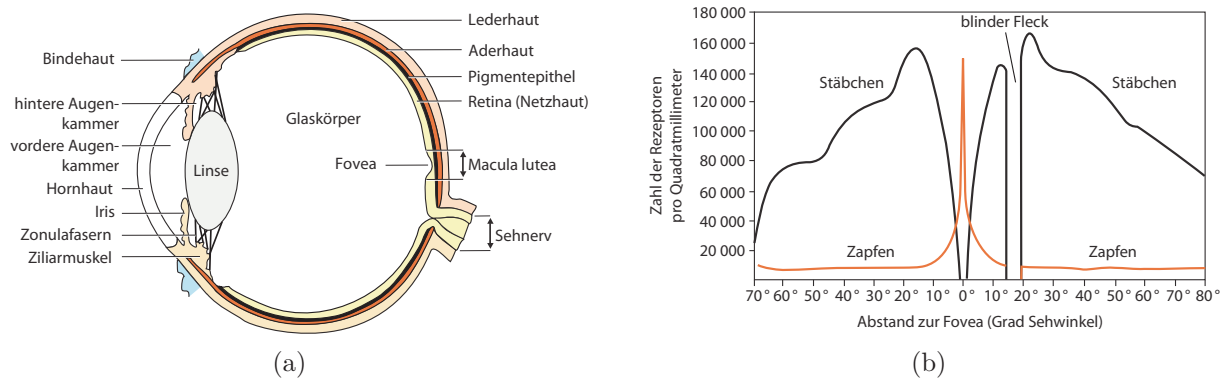


Abbildung 2.1: Aufbau des Auges (a) und Verteilung der Photorezeptoren (b) aus Frings et al. (Frings und Müller 2014)

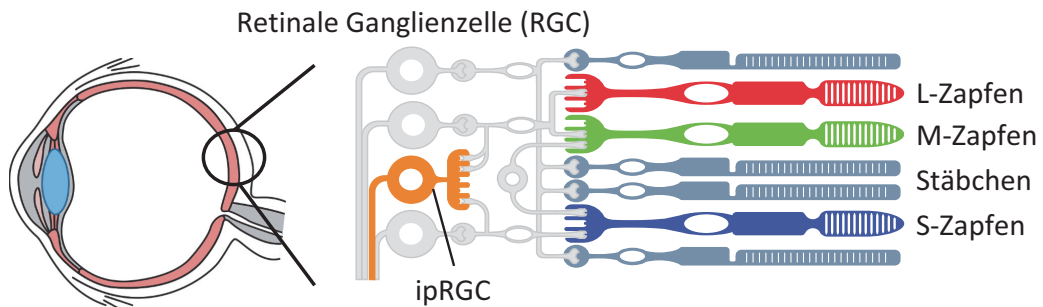


Abbildung 2.2: Photosensitive Rezeptoren im Auge nach Hatori et al. (Hatori und Panda 2010)

M- und S-Zapfen überlappen sich in einem breiten spektralen Bereich. Dies ist signifikant unterschiedlich zu der „Farbtrennung“ in physikalischen Abbildungssystemen wie beispielsweise Displays (Fairchild 2013). Die Funktionsweise der Umwandlung des eintreffenden Lichts am Auge in elektrische Signale im Gehirn verdeutlicht die Überlappung. Wird ein Photon einer bestimmten Wellenlänge absorbiert, wird die Energie durch eine komplexe photochemische Reaktion in ein elektrisches Signal umgewandelt (Bloj und Hedrich 2016). Das elektrische Signal trägt keine separate Information über Intensität und Wellenlänge mehr. Nur die Anzahl der Photonen, die von den Zapfen absorbiert wurden, ist im Signal enthalten. Diese als „Prinzip der Univarianz“ bezeichnete Eigenschaft sagt aus, dass das von den Rezeptoren detektierte Licht ausschließlich von dem effektiven Quanteneinfall abhängt; nicht jedoch von der Art der Quanten (Mitchell und Rushton 1971a,b; Rushton 1972; Rushton et al. 1973a,b,c; Stockman und Sharpe 2000). Physikalische Abbildungssysteme wie Displays basieren hingegen auf einer „Farbseparation“ zwischen den spektralen Farben. Eine exakte Farbproduktion der menschlichen Wahrnehmung mit Displays ist deshalb schwierig, wenn nicht sogar unmöglich (Fairchild 2013).

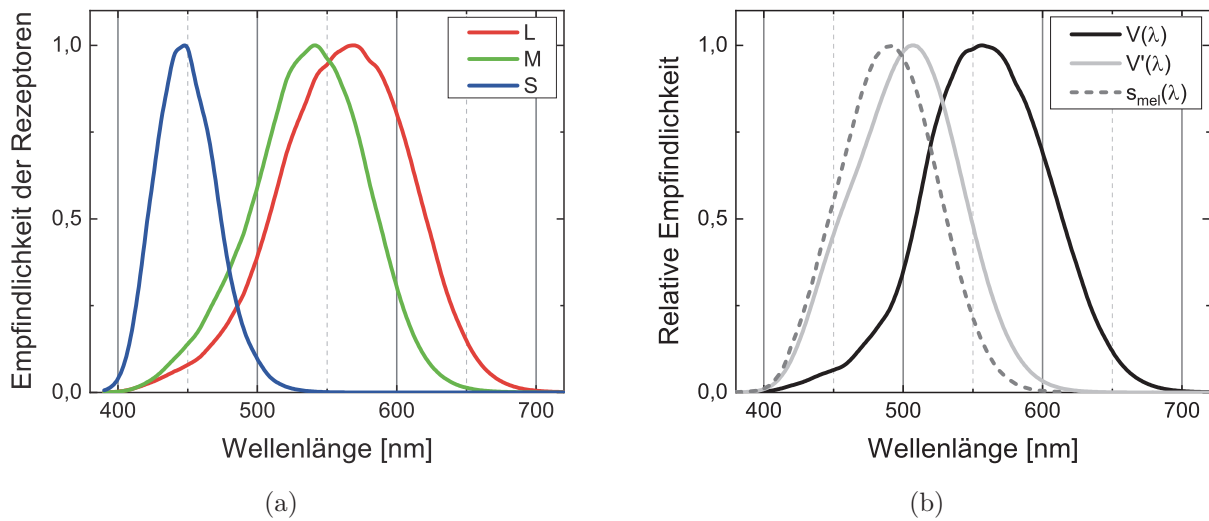


Abbildung 2.3: Spektrale Empfindlichkeit der L-, M- und S-Zapfen (a). CIE Hellempfindlichkeitskurven $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ sowie die Empfindlichkeitskurve für die Melatoninunterdrückung s_{mel} aus Kapitel 2.5.5 (b)

Neben den drei Zapfenarten und Stäbchen existieren weitere photosensitive Ganglienzellen. Diese Zellen enthalten das Opsin² Melanopsin (Provencio et al. 2000). Diese intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC) sind großflächig über die Netzhaut verteilt (Boyce 2014; Dacey et al. 2005; Hattar 2002). Die Signale der ipRGCs erfüllen vielfältige Aufgaben: Detektion der Helligkeit, Übertragung von Informationen zur Synchronisation des zirkadianen Rhythmus und Regulierung des Pupillenreflex der Iris (Ecker et al. 2010; Gooley et al. 2012; Hatori und Panda 2010). Die Anzahl der ipRGCs entspricht ca. 1% aller Ganglienzellen in der menschlichen Retina (Frings und Müller 2014).

Die ipRGCs in der Retina sind direkt über die retinohypothalamischen³ Bahnen mit dem Suprachiasmatischen Nucleus (SCN) verbunden (Hippus et al. 1988). Der SCN, verortet im Hypothalamus im menschlichen Zwischenhirn, ist der endogene zirkadiane Schrittmacher (Berson et al. 2002; Cajochen 2009). Neuronen innerhalb des SCN reagieren auf retinale Beleuchtung mit Änderungen der elektrischen Aktivität. Sie übertragen Signale über polysynaptische⁴ Wege zur Epiphyse (Zirbeldrüse), wo Melatonin während der Abwesenheit von Licht produziert wird (Cajochen 2009; Tosini et al. 2014). Dieses zirkadiane System steuert viele Körperfunktionen. In der vorliegenden Arbeit wird der Mechanismus der Lichtwirkung auf das zirkadiane System mit dem Begriff **nicht-visuelle Wirkung des Lichts** bezeichnet. Detailliert wird dies in Kapitel 2.5 dargestellt.

²Opsin bezeichnet den Proteinanteil eines Sehpigmentes.

³Die retinohypothalamische Bahn bezeichnet ein Bündel an Nerven im Sehnerv, die nicht dem Sehen dienen, sondern die Information des nicht-visuellen Systems übertragen.

⁴„Polysynaptisch“ bezeichnet eine Signalübertragung zwischen den Nervenzellen über mehrere Synapsen.

2.2.2 Wahrnehmung von Farben

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entstand die **Dreifarbentheorie** oder **Trichromatische Farbtheorie** auf der Grundlage der Arbeiten von Thomas Young (1773–1829), James Clerk Maxwell (1831–1879) und Hermann von Helmholtz (1821–1894) (Fairchild 2013; Frings und Müller 2014). Diese Theorie zufolge kann jedes farbige Licht durch Mischung dreier geeigneter Primärfarben dargestellt werden, solange eine der Primärfarben nicht durch eine Mischung der beiden anderen kombiniert werden kann (Bloj und Hedrich 2016). Folglich kann aus den Primärfarben Rot, Grün und Blau jedes farbige Licht gemischt werden. Je größer der Abstand zwischen den Primärfarben Rot, Grün und Blau im Spektrum ist, desto mehr Farben können durch Mischung erzeugt werden (Bloj und Hedrich 2016).

Neben der Dreifarben­theorie entstand Ende des 19. Jahrhundert die **Gegenfarbentheorie**, die auf Ewald Hering (1834–1918) zurückgeht (Hering 1964). Hering stellte fest: Bei der Farbwahrnehmung wird niemals der Eindruck von rötlich-grünen oder gelblich-blauen Farbtönen beschrieben. Er vermutete ein grundlegendes Konzept bei Rot-Grün- und Blau-Gelb-Paaren (Fairchild 2013). Der Gegenfarbentheorie oder auch Opponententheorie zufolge verarbeitet das menschliche visuelle System die Information der drei Zapfen L, M und S durch Verschaltung auf neuronaler Ebene; die Signale der Zapfen werden in den Nervenzellen addiert oder subtrahiert. Es existieren drei Gegenkanäle: Rot gegen Grün (L-M+S), Blau gegen Gelb (L+M-S) und Hell gegen Dunkel (L+M+S) (Fairchild 2013). Abbildung 2.4 zeigt die Verschaltung der Zapfen auf neuronaler Ebene. Rot und Grün werden subtrahiert, die Differenz wird im Rot-Grün-Kanal weitergeleitet. Dagegen ergibt die Addition von Rot und Grün die Empfindung von Gelb. Diese Signale werden von Blau subtrahiert und im Gelb-Blau-Kanal weitergeleitet. Alle Farben werden außerdem gegeneinander aufaddiert und in einem Signal im Schwarz-Weiß-Kanal zusammengefasst. Auf diese Weise kann zwischen den überlappenden spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen effizienter unterschieden werden, als wenn jedes Signal individuell ausgewertet würde (Fairchild 2013). Durch elektrophysiologische Messungen der Zapfen in trichromatischen Tieren und durch psychophysische Wahrnehmungsuntersuchungen bei Menschen konnte diese Verschaltung nachgewiesen werden (Hurvich und Jameson 1955; Svaetichin 1956; Valois et al. 1958).

Die mathematische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Farbwahrnehmung und dem physikalischen Farbreiz werden durch die **Tristimuluswerte** beschrieben. Einem Farbreiz, der eine Farbwahrnehmung hervorruft, wird eine dreidimensionale Farbvalenz zugeordnet. Allgemein werden die Tristimuluswerte R , G und B aus einer beliebigen spektralen Leistungsverteilung $\Phi_e(\lambda)$ nach Gleichung 2.5 berechnet (Fairchild 2013):

$$R = \int \phi_e(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \quad G = \int \phi_e(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \quad B = \int \phi_e(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \quad (2.5)$$

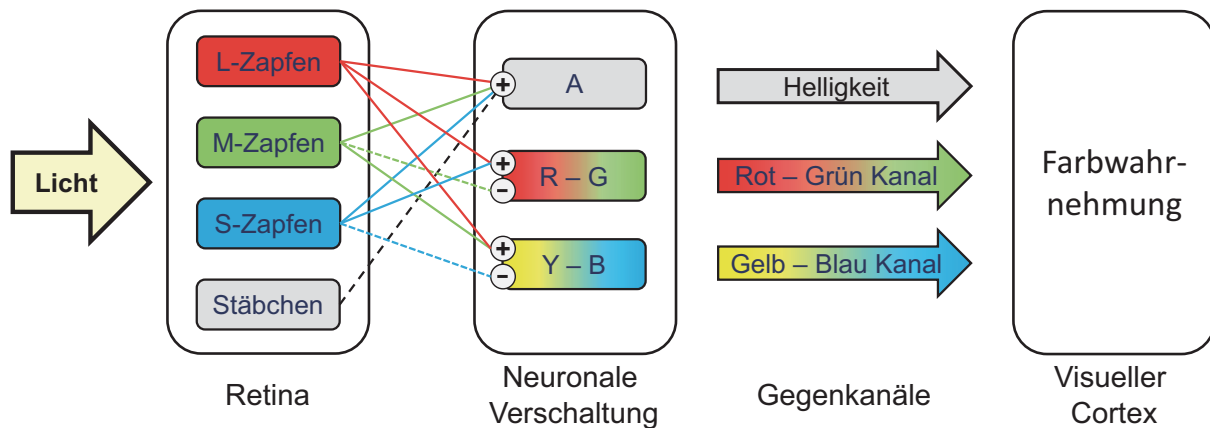


Abbildung 2.4: Verschaltung der Rezeptoren und Gegenfarbkanäle

wobei $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{b}(\lambda)$ die spektralen Farbempfindlichkeitskurven der drei Farbrezeptoren Rot, Grün und Blau des CIE 1931-Standardbeobachter nach Abbildung 2.5 sind (CIE 2004). Zu beachten sind die teilweise negativen Anteile der roten Farbempfindlichkeit. Demzufolge müssen beispielsweise bei einem monochromatischem Farbreiz von 500 nm die roten Anteile der spektralen Leistung abgezogen werden (Fairchild 2013).

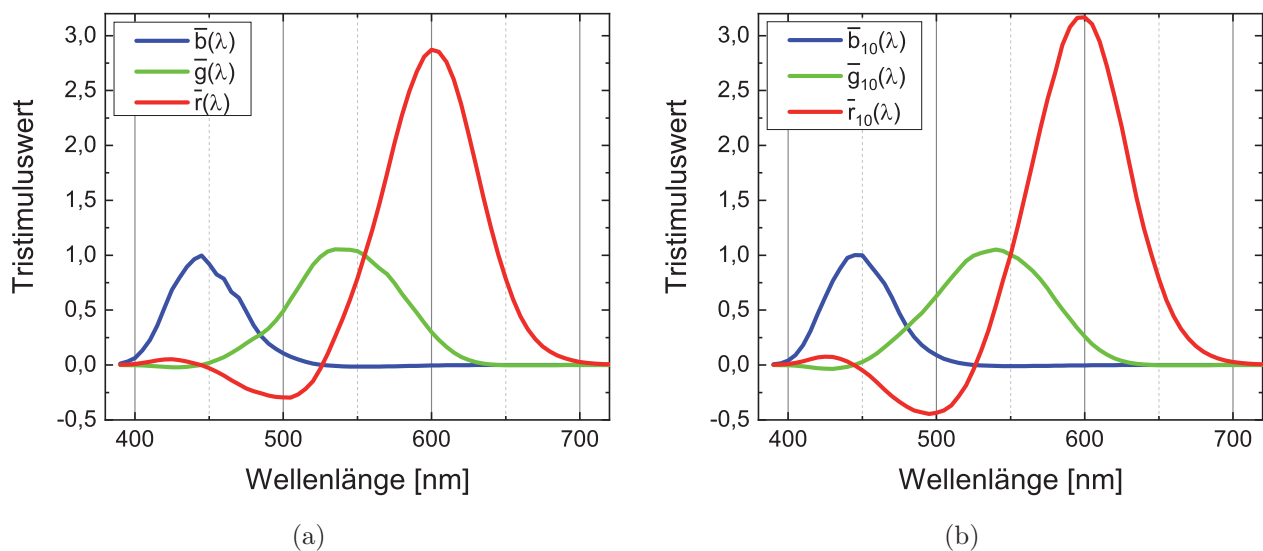


Abbildung 2.5: Farbempfindlichkeitskurven des CIE 1931 Standardbeobachters für 2° (a) und 10° (b) nach Stiles und Burch

Da 1931 die Berechnung aufgrund des negativen Anteils der realen $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{b}(\lambda)$ Primärfarben schwierig war, wurde diese zu den imaginären Primärfarben ohne Negativanteile $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ nach Abbildung 2.6 transformiert (CIE 2004). Die CIE definierte aus diesen imaginären Normspektralwertfunktionen die Normfarbwerte X , Y und Z ab. Diese **CIE-**

Tristimuluswerte wurden so gewählt, dass nur positive Farbwerte auftreten (Baer 2006; Green und MacDonald 2002; Schanda 2007). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden mit dem Begriff der Tristimuluswerte die CIE-Tristimuluswerte X , Y und Z bezeichnet. Die Berechnung der Tristimuluswerte wird äquivalent Gleichung 2.5 mit den spektralen Farbanpassungsfunktionen (CIE-Normbasisvektoren) der Empfindlichkeitskurve $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ berechnet. Gemäß den Empfehlung der CIE kann die Integration der Formeln 2.5 durch numerische Summation in Wellenlängenintervallen, $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ nach den Gleichungen 2.6 ersetzt werden (Schanda 2007).

$$X = k \sum \phi_e(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda \quad Y = k \sum \phi_e(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda \quad Z = k \sum \phi_e(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda \quad (2.6)$$

Die Konstante k ist dabei die Normalisierungskonstante mit der spektralen Leistungsverteilung $S(\lambda) = \Phi_e(\lambda)$ des Leuchtmittels und wird nach Gleichung 2.7 berechnet.

$$k = \frac{100}{\sum \bar{y}(\lambda)S(\lambda)\Delta\lambda} \quad (2.7)$$

Abbildung 2.6 zeigt die Normspektralwertfunktionen der drei Farbrezeptoren X (Rot), Y (Grün) und Z (Blau), die von Stockman und Sharpe (Stockman und Sharpe 2000) beschrieben und 2006 von der CIE als Normalbeobachter definiert wurden (CIE 2006). Die spektrale Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ der menschlichen Wahrnehmung wird durch die $\bar{y}(\lambda)$ -Kurve festgelegt (Baer 2006; Green und MacDonald 2002). Die $V(\lambda)$ -Kurve (Abbildung 2.3(b)) beschreibt den Zusammenhang zwischen Wellenlänge und wahrgenommener Helligkeit für einen Standardbeobachter bei photopischen Bedingungen, normalisiert auf 1 bei dem Maximum von 555 nm . Die entsprechende Empfindlichkeitskurve für skotopisches Sehen beschreibt die $V'(\lambda)$ -Kurve mit einem Maximum bei 505 nm . Die von der CIE definierten Standardbeobachter repräsentieren die Eigenschaften der Farbvariation der durchschnittlichen Bevölkerung (Sarkar 2014).

Menschen können etwa zehn Millionen Farben unterscheiden (Judd und Wyszecki 1975). Die Annahme liegt nahe, dass kleinste Abweichungen in der Farbdarstellung unterschieden werden können. Das menschliche Auge ist in der Lage, einen Weißabgleich durchzuführen. Diese chromatische Adaption passiert beispielhaft bei Tageslicht mit einem hohen Blaulichtanteil. Bei der Betrachtung einer weißen Fläche wird die geringere Anzahl an S-Zapfen ausgeglichen, indem diese S-Zapfen weniger sensitiv werden (Fairchild 2013). Die Farbadaption hat zur Folge, dass der Mensch beispielsweise bei wechselnden Lichtbedingungen wie dem Tageslicht, dem Wechsel der Helligkeit und der Farbtemperatur Objekte farbkonstant wahrnimmt (Bloj und Hedrich 2016).

In der Literatur werden eine Vielzahl von Effekten der Farbwahrnehmung beschrieben. Für diese Arbeit werden die folgenden drei Wahrnehmungseffekte erläutert: Der Helmholtz-Kohlrausch-

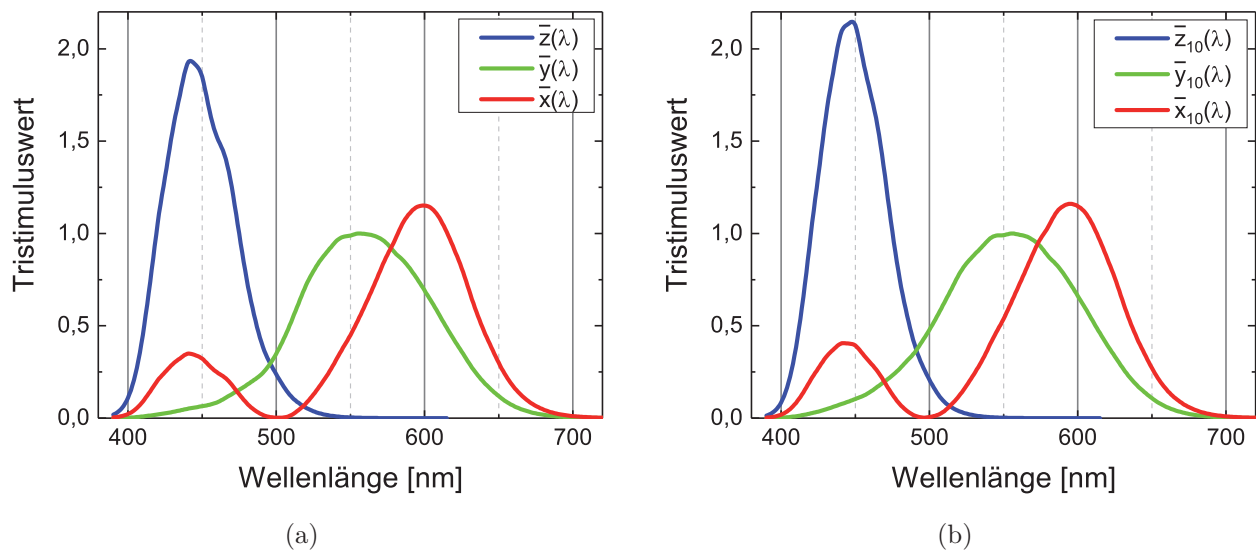


Abbildung 2.6: Empfindlichkeitskurven der drei Farbrezeptoren X , Y und Z für den Normalbeobachter mit 2° -Gesichtsfeldgröße (a) und 10° -Gesichtsfeldgröße (b) nach (CIE 2006)

Effekt, der Hunt-Effekt und die Farberinnerung. Diese Effekte beschreiben den Zusammenhang zwischen Leuchtdichte, Farbsättigung und wahrgenommener Helligkeit einer Farbe. Sie werden in der Evaluierung dieser Arbeit zur Erläuterung der Ergebnisse benötigt.

Kohlrausch beschreibt 1935 einen Effekt der Farbwahrnehmung: Steigt die Sättigung einer Farbe bei konstanter Leuchtdichte, wird die Farbe heller wahrgenommen. Dies ist der **Helmholtz-Kohlrausch-Effekt** (Green und MacDonald 2002; Wyszecki und Stiles 2000).

Hunt quantifiziert 1952 durch ein Experiment die Veränderungen der Gesamtfarbigkeit als Funktion der Leuchtdichte. Diese Eigenschaft der Wahrnehmung wird als **Hunt-Effekt** bezeichnet und beschreibt eine Erhöhung der wahrgenommenen Farbsättigung bei Erhöhung der Leuchtdichte (Green und MacDonald 2002; Hunt 1952; Johnson 2015).

Witzel und Hansen untersuchen den Effekt der **Farberinnerung**, die auch als Gedächtnisfarbe bezeichnet wird (Witzel und Hansen 2015). Die Farben von Objekten werden typischerweise durch die Erfahrungen der Menschen gelernt (Witzel und Gegenfurtner 2014). Die Autoren beschreiben die Effekte der Farberinnerung auf unterschiedliche Aspekte der Farbwahrnehmung. Sowohl die Wahrnehmung von Objekten als auch Szenen, die Benennung von Farben und die Farbkonstanz werden durch den „Memory-Farbeffekt“ beeinflusst (Witzel und Hansen 2015).

Zusammenfassend kann die Farbwahrnehmung beim Menschen wie folgt beschrieben werden: Die Farberscheinung eines Lichtreizes ist nicht unabhängig von seinen räumlichen und zeitli-

chen Eigenschaften (Fairchild 2013). Die Wahrnehmung von Farben wird durch die gelernte Erfahrung beeinflusst.

2.2.3 Metamerie

1919 beschreibt Ostwald erstmals den Effekt der Metamerie (Ostwald 1919). Die Eigenschaften der menschlichen Farbwahrnehmung werden durch die spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfentypen definiert. Wird die Energie der Strahlung im Auge von den Zapfen absorbiert, geht der spektrale Ursprung des Signals verloren (vgl. „Prinzip der Univarianz“ in Kapitel 2.2.1). Sind die Signale der drei Zapfentypen für zwei Stimuli gleich, müssen diese bei der gleichen Bedingung dieselbe Farbvalenz hervorrufen, da es keine weiteren Informationen gibt (Fairchild 2013). Diese Eigenschaft der menschlichen Wahrnehmung wird als Metamerie bezeichnet. Das Phänomen der Metamerie kann in zwei unterschiedlichen Ausprägungen vorliegen (Deutsches Institut für Normung e.V. 2014-10-01b; Fairchild 2013; Green und MacDonald 2002):

- **Beleuchtungs-Metamerie** oder **Lichtart-Metamerie** beschreibt, dass die Körperfarben zweier Objekte unter einer bestimmten Lichtart als identisch wahrgenommen werden. Bei einer veränderten Lichtart unterscheidet sich der Farbeindruck.
- **Beobachter-Metamerie** liegt vor, wenn die Körperfarben zweier Objekte unter zwei unterschiedlichen spektralen Leistungsfunktionen von einem Beobachter identisch wahrgenommen werden. Ein anderer Beobachter nimmt bei gleicher Lichtart und der gleichen Umfeldbedingung eine Differenz der Körperfarbe wahr.

In der DIN 6172 wird über die beiden genannten Metamerie-Arten hinaus eine dritte Ausprägung unterschieden (Deutsches Institut für Normung e.V. 2014-10-01b):

- **Feldgrößen-Metamerie** beschreibt, wenn die Körperfarben zweier Objekte für die Größe eines Beobachtungsfeldes auf der Netzhaut als gleich wahrgenommen werden, während sie auf einem veränderten Beobachtungsfeld auf der Netzhaut anders wahrgenommen werden.

Der Effekt der Feldgrößen-Metamerie kann durch die Betrachtung von Objekten aus unterschiedlichen Entfernungen entstehen, da sich die Größe des Beobachtungsfeldes mit dem Abstand verändert. Beobachter-Metamerie ist eine unvermeidliche grundlegende Einschränkung der Farbmetrik (Fairchild und Wyble 2007).

Die mathematische Beschreibung der Metamerie basiert auf der spektralen Antwort der L-, M- und S-Zapfen. Zwei Stimuli, die durch ihre spektrale Leistungsverteilung $\Phi_1(\lambda)$ und $\Phi_2(\lambda)$

beschrieben werden, stimmen in ihrer Farbe überein, wenn das Produkt ihrer spektralen Leistungsverteilung und jeder der drei Zapfen-Antworten $L(\lambda)$, $M(\lambda)$ und $S(\lambda)$ integriert über die Wellenlänge gleich sind. Gleichung 2.8 beschreibt die Gleichheit zweier Stimuli (CIE 1989; Fairchild 2013; Wyszecki und Stiles 2000):

$$\begin{aligned}\int \Phi_1(\lambda)L(\lambda)d\lambda &= \int \Phi_2(\lambda)L(\lambda)d\lambda \\ \int \Phi_1(\lambda)M(\lambda)d\lambda &= \int \Phi_2(\lambda)M(\lambda)d\lambda \\ \int \Phi_1(\lambda)S(\lambda)d\lambda &= \int \Phi_2(\lambda)S(\lambda)d\lambda\end{aligned}\tag{2.8}$$

Da die drei Integrale für eine Farbanpassung gleich sein müssen, ist es nicht notwendig, dass die spektrale Leistungsverteilung der beiden Stimuli für jede Wellenlänge gleich ist (Fairchild 2013).

Ein farbnormaler Beobachter besitzt drei univariante⁵ Zapfentypen mit einer unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeit (Abbildung 2.5). Diese Beschränkung auf drei Dimensionen bedeutet, dass viele Lichtpaare, die sich physikalisch voneinander unterscheiden, identisch erscheinen können. Solche Paare sind als Metamere bekannt und entstehen immer dann, wenn die Glieder des Paares in jeder der drei Zapfen-Klassen die gleichen Photonenabsorptionsraten erzeugen. Eine Konsequenz der Trichromie und Metamerie ist, dass viele Farben durch dreifarbige, additive Abbildungssysteme wie Farbfernseher, Monitore und Projektoren reproduziert werden können (Stockman und Brainard 2015).

Die CIE beschreibt zwei Methoden zur Bewertung der Metamerie: Erstens den „Special metamerism index: change in illuminant“ M_{ilm} (Änderung der Lichtart) (CIE 1972, 2004) und zweitens den „Special metamerism index: Change in observer“ M_{obs} (Änderung des Beobachters) (CIE 1989, 2004). Der spezielle Metamerieindex für die Änderung der Lichtart wird folgendermaßen berechnet: Sind die Tristimuluswerte, wie in Formel 2.8 beschrieben, für ein Objekt identisch, wird für den Metamerieindex bei Wechsel der Lichtquelle die CIE-Farbdifferenz ΔE_{ab}^* (Kapitel 2.3.3) angegeben. Es gilt:

$$M_{ilm} = \Delta E_{ab}^*\tag{2.9}$$

Der spezielle Metamerie-Index für die Änderung des Beobachters ist definiert als der Grad der Farbfehlpassung für metamere Farbpaare (Objektfarbe oder Leuchtmittel), die sich aus der Substitution des Referenzbeobachters von einem Testbeobachter ergeben. Der Referenzbeobachter ist dabei der CIE 1931- oder CIE 1964-Standardbeobachter. Die Definition eines Metamerie-Index für die Beobachtungsmetamerie ist komplex aufgrund der immensen Variabilität in den spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen-Photorezeptoren von einzelnen Beobachtern mit normalem Farbsehen. Diese Variabilität zeigt sich in den gemessenen Farbanpassungsfunk-

⁵Die Bezeichnung der Univarianz leitet sich vom „Prinzip der Univarianz“ aus Kapitel 2.2.1 ab.

tionen und damit in Farbfehlanspassungen in metameren Paaren, wenn diese von einzelnen Beobachtern bewertet wird (Sarkar 2014).

Eine Alternative mathematische Metamerie-Beschreibung ist die Wyszecki-Hypothese (Wyszecki und Stiles 2000), die ein radiometrisches Spektrum als Summe von zwei Teilspektren beschreibt. Ein fundamental Metamerer und ein Differenzspektrum (Schwarz-Metamer). Mit Hilfe der Cohen-Matrix \mathbf{R} können Spektren in diese Anteile zerlegt werden (Cohen und Kappauf 1982). Diese Methode wird in dieser Arbeit nicht verwendet.

In der vorliegenden Arbeit werden folgende Metamerie-Bezeichnungen bezüglich Displaysysteme verwendet: Zusätzlich zur Beleuchtungs-Metamerie und Beobachter-Metamerie wird der Begriff **Bildschirm-Metamerie** verwendet. Bildschirm-Metamerie ist eine Eigenschaft von Displays mit mehr als drei Primärfarben (vgl. „Multi-Primary Displays“ in Kapitel 2.4.5). Wenn ein Display mehr als drei Primärfarben darstellen kann, das Bildsignal des Displays jedoch auf drei Farben (RGB) basiert, ist keine eindeutige Zuordnung zwischen Farben des Bildsignals und dargestellter Farbe möglich. Diese als Bildschirm-Metamerie bezeichnete Eigenschaft wird in Kapitel 2.4.6 beschrieben.

2.3 Farbmodelle

Im Allgemeinen wird ein Farbsystem als systematische Anordnung von Farbvalenzen bezeichnet, aus denen ein Farbmodell definiert wird. Nach Green und MacDonald werden drei Kategorien von Farbsystemen unterschieden (Green und MacDonald 2002):

- Das **mathematische System** bildet sich aus einer mathematischen Transformation, beispielsweise aus den CIE-Tristimuluswerten, und beschreibt einen einheitlichen Farbraum bzw. ein Farbmodell.
- Das **gemessene System** existiert in physischer Form und wird beschrieben durch die Messung einer Vielzahl von Testfarben. Dies bedeutet, es existieren Testfarben mit bekannten Farbwerten. Durch die optische Vermessung der Testfarben wird das Farbsystem beschrieben.
- Das **geräteabhängige System** steht in direktem Zusammenhang mit einem darstellenden System, basierend auf Primärfarben. Diese Systeme, wie beispielsweise das RGB- oder CMYK- System, bilden die Grundlage der meisten Displaysysteme und Drucker. Das RGB-System wird in Kapitel 2.4.1 eingeführt.

Das 1905 von Munsell beschriebene Munsell-Farbsystem ist eines der ältesten und am weitest verbreiteten Farbsysteme, basierend auf physischen Farbmustern (Green und MacDonald 2002). Das Ordnungsprinzip besteht aus den Werten des Farbtons (**H** für Hue), der Sättigung (**C** für Chroma) und der Wertigkeit bzw. der Helligkeit (**V** für Value) (Munsell 1905). Die Munsell **H**-Skala ist geteilt in fünf Hauptbunttöne: 5R (Rot), 5Y (Gelb), 5G (Grün), 5B (Blau) und 5P (Purpur). Diese sind jeweils in fünf Zwischenbunttöne 5RY, 5GY, 5BY, 5BG und 5RP unterteilt. Die zehn Farbtöne werden wieder in zehn Abstufungen unterteilt und mit den Zahlen 0 bis 10 bezeichnet und bilden zusammen eine kreisrunde Farbfläche. Der Wert des Munsell **C** repräsentiert den Weg vom Mittelpunkt des Kreises nach außen und steigt mit der Sättigung. Der Wert Munsell **V** steht senkrecht auf dem Mittelpunkt des Kreises und geht von 10 (Weiß) bis 0 (Schwarz) (Green und MacDonald 2002).

Es existieren viele mathematische Farbmodelle (Fairchild 2013; Green und MacDonald 2002; Schanda 2007; Wyszecki und Stiles 2000). In dieser Arbeit werden die von der internationalen Beleuchtungskommission (CIE) definierten Farbsysteme verwendet, die auf der Beziehung einer physikalischen Farbvalenz und der menschlichen Farbwahrnehmung beruhen. Die CIE hat mehrere Farbraumsysteme definiert.

2.3.1 CIE-Normvalenzsystem

Im Jahr 1931 wird der CIE 1931 Standardbeobachter für ein 2° Sichtfeld veröffentlicht. Die Definition des Standardbeobachters wird aus zwei Experimenten von Wright (Wright 1929, 1930) und Guild (Guild 1932) abgeleitet. Darin werden die ursprünglich spektralen Empfindlichkeitskurven der Photorezeptoren festgelegt (Abbildung 2.5). Um einen Standardbeobachter zu definieren, werden die spektralen Zusammensetzungen der Primärfarben festgelegt und die Leuchtdichten definiert. Die Primärfarben sind 700 nm für Rot, $546,1\text{ nm}$ für Grün und $435,8\text{ nm}$ für Blau (Schanda 2007). Damit die Energieverteilung des Spektrums der Farbe entspricht, wird definiert, wenn 1 cd/m^2 rotes Licht verwendet wird, dann werden $4,5907\text{ cd/m}^2$ grünes und $0,0601\text{ cd/m}^2$ blaues Licht benötigt (Schanda 2007).

Trotz der Tatsache, dass die Anzahl der Probanden in der Arbeit von Guild sieben und in der Arbeit von Wright zehn sind, wird der CIE 1931 Standardbeobachter für viele Jahre verwendet (Schanda 2007). Im Jahr 1958 wird der 2° Standardbeobachter (Stiles und Burch 1958) und 1959 der 10° Standardbeobachter nach Stiles und Burch (Stiles und Burch 1959) veröffentlicht. Im Jahr 2000 veröffentlichen Stockman und Sharpe (Stockman und Sharpe 2000) neue Empfindlichkeitsfunktionen der L-, M-, und S-Zapfen (Englisch: cone fundamentals), die 2006 von der CIE (CIE 2006) als neuer Standard definiert werden (Abbildung 2.6).

Die Tristimuluswerte, die einen Farbreiz vollständig beschreiben, werden nach Formel 2.6 berechnet. Zur Vereinfachung des dreidimensionalen Tristimuluswertes, wird die zweidimensionale CIE-Normfarbtafel (Abbildung 2.7(a)) eingeführt. Die Koordinaten der Normfarbtafel lassen sich aus dem Tristimulus nach Formel 2.10 berechnen.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (2.10)$$

Es gilt die Beziehung $x + y + z = 1$. Damit lässt sich eine Komponente aus den beiden anderen berechnen.

Die CIE 1931 Normfarbtafel ist geeignet, um einen Farbreiz zu beschreiben. Der Farbabstand zwischen unterschiedlichen Farben entspricht jedoch nicht der wahrgenommenen Farbe. MacAdams zeigt in seiner Arbeit aus dem Jahr 1942 die gerade noch wahrnehmbaren Farbabstände unterschiedlicher Farben. Er beschreibt einen Bereich um einen Farbort, in dem die Farbe als gleichabständig⁶ wahrgenommen wird. Die Darstellung dieser MacAdams-Ellipsen sind im CIE-Normvalenzsystem in der Länge und Richtung der Ellipsenachsen abhängig von dem jeweiligen Farbort. Bei Grüntönen ist das Auge nicht so empfindlich wie bei Blautönen. Aus diesem Grund unterscheiden sich die Größen der Ellipsen bei unterschiedlichen Farbtönen deutlich (Blankenbach 2016a).

2.3.2 CIE-1976 UCS-System

Im Jahr 1964 wird das CIE UCS-System eingeführt und 1975 im CIE Technical Report 1.3 definiert (CIE 2004). Das CIE-1976 UCS-System beschreibt die beiden Farbmodelle des CIELUV-Farbraumsystems und des CIELAB-Farbraumsystems. In diesen Farbraumsystemen kann der Tristimulus-Wert des CIE 1936 Standardbeobachters angewendet werden (Schanda 2007). Jedoch ist anders als das CIE-Normvalenzsystem das CIE-1976 UCS-System geräteunabhängig und zur mathematischen Berechnung mit euklidischer Geometrie geeignet (Green und MacDonald 2002). Die Motivation zur Einführung des CIE-1976 UCS-Systems ist auf die MacAdams-Ellipsen (MacAdam 1942) zurückzuführen. Im CIE-1976 UCS-System werden die Ellipsen näherungsweise als kreisrunde Flächen dargestellt (Schanda 2007). Die beiden im CIE-1976 UCS-System beschriebenen Farbräume CIELAB und CIELUV sind gleichabständig. Die wahrgenommene Helligkeit korrespondiert dabei direkt mit den gemessenen Werten für die Helligkeit (L) (Blankenbach 2016a) und ist sowohl im CIELAB als auch im CIELUV identisch (Schanda 2007).

⁶Gleichabständig oder Delta E bezeichnet den empfundenen Farbabstand zweier Farben. Beschreibung folgt in Kapitel 2.3.3

CIELAB-Farbraum

Der CIELAB-Farbraum beschreibt die von Menschen wahrnehmbaren Farben. Es wird überwiegend für die subtraktive Farbmischung der Beschreibung von Körperfarben verwendet. Der Farbraum ist ebenfalls auf transmittierenden Objekten wie beispielsweise Displays anzuwenden, wenn diese dazu verwendet werden, reflektierende oder transmittierende Objekte zu simulieren (Deutsches Institut für Normung e.V. 2012-06-01). Formel 2.11 zeigt die Berechnung der Koordinaten des CIELAB-Farbraumes (Cheung 2016),

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \left(\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right) \\ b^* &= 200 \left(\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

wobei X_n , Y_n und Z_n der Tristimuluswert eines referenzierten neutralen weißen Stimulus ist (Green und MacDonald 2002; ISO 2017-07-01).

CIELUV-Farbraum

Der CIELUV-Farbraum ist als Teil des CIE-1976 UCS-Systems geräteunabhängig und ermöglicht eine gleichabständige Darstellung zwischen den Farbtönen. Zwei Farbtöne mit gleichem geometrischem Abstand, haben einen der Wahrnehmung entsprechenden empfindungsgemäßen Abstand. Der CIELUV-Farbraum wird zur Beschreibung additiver Farbmischungen wie Lichtquellen oder Displays verwendet (Deutsches Institut für Normung e.V. 2017-01-01). Das CIELUV-System wird mit den Werten L^* , u^* , und v^* beschrieben, die einen dreidimensionalen Farbraum aufspannen, bei denen die Achsensysteme orthogonal zueinander sind (Schanda 2007). L^* beschreibt die Achse der Helligkeit und u^* , v^* spannen eine Farbartebene dazu auf. Werden die Koordinaten u^* und v^* aus dem Tristimulus XYZ abgeleitet, bezeichnet man diese als u' und v' und sie werden nach Formel 2.12 berechnet. Die Koordinaten im CIELUV Farbraum lassen sich direkt aus den Koordinaten der CIE 1931 Normfarbtafel nach Formel 2.13 berechnen.

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (2.12)$$

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.13)$$

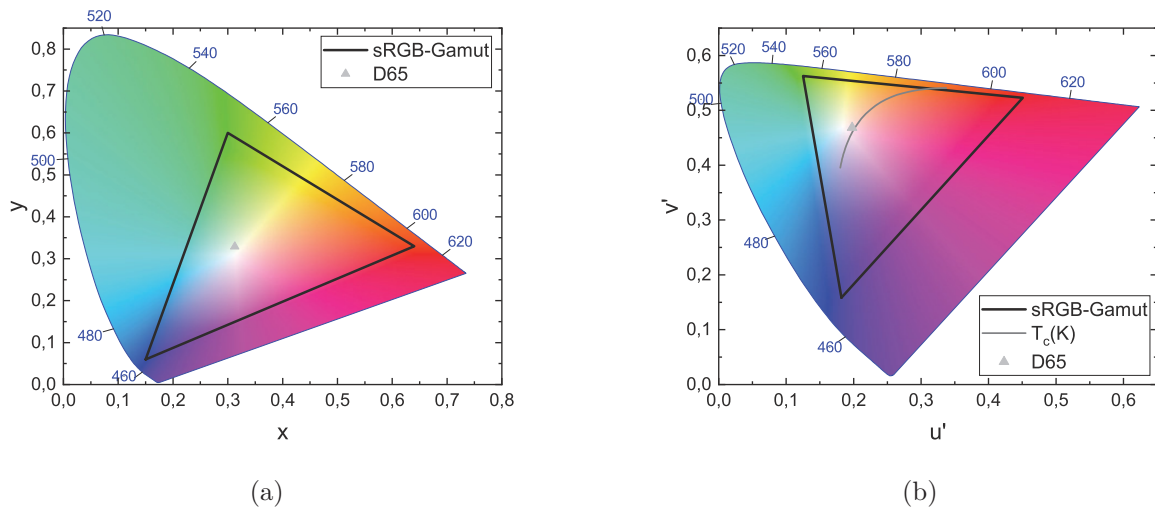


Abbildung 2.7: CIE-1931 xy Farbraum (a) und CIE-1976 u'v' Farbraum (b) mit sRGB-Gamut, D65 Weißpunkt und Schwarzkörperkurve $T_c(\lambda)$

Abbildung 2.7 stellt die CIE-1931 Normfarbtafel (a) und den CIELUV-Farbkörper dar. Innerhalb der Farbkörper ist der sRGB-Farbraum (Kapitel 2.4.1), der D65 Weißpunkt und die Schwarzkörperkurve sowie die Farborte des idealen planckschen Strahlers eingezeichnet.

2.3.3 Wahrnehmbarer Farbunterschied

In einem einheitlichen Farbraum mit orthogonalen Primärachsen ist der Unterschied zwischen zwei Farbvalenzen der euklidische Abstand zwischen den beiden Koordinaten. Dieser wird als ΔE bezeichnet und berechnet sich im CIELUV-Farbsystem nach Formel 2.14 (CIE 2004; Green und MacDonald 2002).

$$\Delta E_{L'u'v'} = \sqrt{\Delta L'^2 + \Delta u'^2 + \Delta v'^2} \quad (2.14)$$

Der Farbunterschied $\Delta E = 1$ entspricht dem gerade noch wahrnehmbaren Unterschied eines menschlichen Beobachters (Blankenbach 2016a). Der Farbabstand ist sowohl im CIELUV-System als auch im CIELAB-System anwendbar und wird analog zu Formel 2.14 berechnet. Wird der Farbabstand in einer Farbebene angegeben, geschieht dies ohne die Angabe der Helligkeit L . Die Unterscheidung wird anhand der Indizes deutlich: $\Delta E_{u'v'}$, $\Delta E_{L'u'v'}$ und $\Delta E_{L^*a^*b^*}$. Der in der Literatur oft verwendete Begriff der „CIELAB-Einheiten“ beschreibt den Farbabstand ΔE_{ab}^* . Auf einem Display können beispielsweise Farbveränderungen bei identischer Helligkeit von $\Delta E_{u'v'} \geq 0,004$ unterschieden werden (Blankenbach 2016a).

Auf Empfehlung von Berns (Berns 1993) wird 1994 eine modifizierte Version der Farbdifferenzgleichung als ΔE_{94} veröffentlicht (Brainard 2003; Cheung 2016). Dabei ist die Gewichtungsfunktion unterschiedlich. Zwischen den Gleichungen des Farbabstandes ΔE und ΔE_{94} gibt es eine große Diskrepanz in der Vorhersage der Helligkeitsunterschiede und Probleme bei der Vorhersage von Grau- und Blautönen (Cheung 2016). Die CIE bildete ein technisches Komitee (TC) 1-47 zur Entwicklung einer verallgemeinerten Farbdifferenzgleichung. Die CIEDE2000-Gleichung (ΔE_{00}) nach Formel 2.15 (CIE 2001, 2004; Sharma et al. 2005). ΔE_{00} korrigiert Ungenauigkeiten innerhalb von CIELAB und bietet einen Wert, der mehr der wahrgenommenen Farbdifferenz entspricht (Berns 2000). Sharma et al. zeigt Implementierungsrichtlinien für die Verwendung der CIEDE2000-Farbabstandsformel. (Sharma et al. 2005)

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\frac{\Delta L'^2}{k_L S_L} + \frac{\Delta C'^2}{k_C S_C} + \frac{\Delta H'^2}{k_H S_H} + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H}} \quad (2.15)$$

Details zur ΔE_{00} -Gleichung und die Beschreibung der Faktoren finden sich in Anhang A.1.2.

Bei der Untersuchung der Farbwahrnehmung wird in vielen Studien eine Farbdifferenz von 0-5 ΔE_{ab}^* untersucht. Je nach untersuchter Farbe werden auch Werte von 12 ΔE_{ab}^* akzeptiert (Green und MacDonald 2002). Stokes et al. zeigen an einem CRT Monitor, dass Realaufnahmen mit einem Farbabstand von 2,5 ΔE_{ab}^* für den Betrachter nicht sichtbar sind (Stokes et al. 1992). Aldaba et al. vergleichen Naturszenen auf einem CRT Monitor. Hierbei wurden farblich veränderte Bilder mit den Originalen verglichen. Die Beobachter konnten auf einem Bildschirm einen Unterschied ab 1,6-2 ΔE_{ab}^* und auf einem zweiten Bildschirm ab 2,5-2,8 ΔE_{ab}^* erkennen (Aldaba et al. 2006).

2.4 Displaytechnik

Es gibt zwei Kategorien von elektronischen Informationsdisplays: Die erste umfasst die emittierenden Displays wie Kathodenstrahlröhren (CRT), Plasmadisplays (PDP), Elektrolumineszenzdisplays (ELD), organische Licht emittierende Dioden (OLED), Licht emittierende Dioden (LED) und Feldemissionsdisplays (FED). Die zweite Kategorie bilden die nicht emittierenden Displays wie Flüssigkristalldisplays (LCD) oder elektronische Papiere. Emittierende Displays strahlen das Licht selbstständig aus. Nicht emittierende Displays werden von einer Lichtquelle be- oder durchleuchtet (Boyd 2016a; Kobayashi et al. 2009). LCDs sind heute in großer Vielzahl zur Informationsdarstellung zu finden; beispielsweise in LC-Fernsehern, Computern, Laptops, Mobiltelefonen, Autos und in Navigationssystemen.

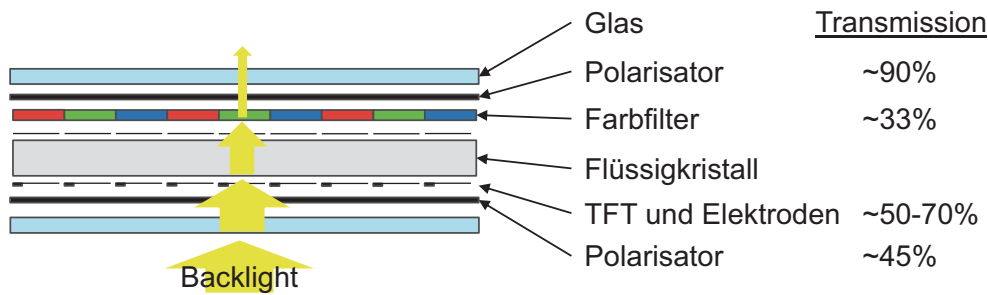


Abbildung 2.8: Aufbau eines LCP mit Angabe der Transmissionen nach Boyd (Boyd 2016a)

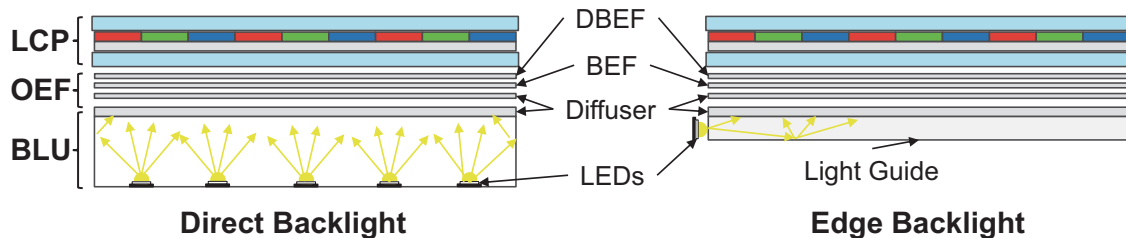


Abbildung 2.9: Aufbau eines LCDs mit LCP, OEF und den zwei Arten der BLU: Direct Backlight und Edge Backlight

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den nicht emittierenden LCDs. Ein LCD besteht aus zwei Komponenten: Erstens aus dem Flüssigkristallpanel (LCP: Liquid Crystal Panel), dessen Pixel durch Anlegen einer Spannung das Transmittieren von Licht steuern (Abbildung 2.8). Zweitens aus der Hintergrundbeleuchtungseinheit (BLU: Backlight Unit), die als Lichtquelle dient und dessen Licht von dem LCP gefiltert wird. Es gibt unterschiedliche Arten zur Be- oder Durchleuchtung eines LCP. Zwei Arten von BLUs werden hier beschrieben; zum einen die direkte Hintergrundbeleuchtung (Direct Backlight), zum zweiten die seitlich einkoppelnden Hintergrundbeleuchtung (Edge Backlight). Abbildung 2.9 zeigt den Aufbau eines LCDs und die beiden Arten der BLUs. Bei der direkten Hintergrundbeleuchtung sind die Lichtquellen über den Bereich der Displayfläche verteilt. Bei der seitlich einkoppelnden Hintergrundbeleuchtung wird das Licht der seitlich angebrachten Lichtquellen durch einen Lichtleiter homogen verteilt (Boyd 2016a; Zeiler und Hüttner 2009).

Die BLU wird von einer optischen Diffusor-Platte bedeckt. Am häufigsten wird dies mit einer PMMA-Platte (Polymethylmethacrylat) realisiert (Ishiwatari 2009a). Licht, das von einem Medium mit einem hohen Brechungsindex zu einem niedrigen Brechungsindex wandert, wird anhängig vom Einfallswinkel unterschiedlich gebrochen und reflektiert. Zur maximalen Ausbeute der Hintergrundbeleuchtung befindet sich zwischen der BLU und dem LCP ein Satz von Folien, die als optische Verbesserungsschicht (OEF: Optical Enhancement Films) bezeichnet

werden. Typischerweise besteht ein OEF aus drei Schichten; einer weiteren Diffusorfolie, einem BEF (Brightness Enhancement Film) und einem DEBF (Dual Brightness Enhancement Film). Der BEF besteht aus einer Prismenfolie, die das Licht in axiale Richtung bündelt und das reflektierte Licht in das Prisma zurückführt und in einem neuen Einfallswinkel ausgibt. Die Verstärkung in axiale Richtung kann bis zum Faktor 2,5 zunehmen. Der DEBF polarisiert das Licht in die Ebene des LCP. Die axiale Leuchtdichte kann um den Faktor 1,6 erhöht werden (Boyd 2016a; Boyd 2016b; Ishiwatari 2009b).

Die Transmission eines LCD-Panels liegt bei ca. 3,5 % bis <7 % (vgl. Abbildung 2.8). Um beispielsweise eine gewünschte Leuchtdichte von 500 cd/m^2 zu erreichen, wird für die BLU eine Leuchtdichte von ca. $15\,000 \text{ cd/m}^2$ benötigt (Lee 2009).

LEDs zur Hinterleuchtung von Displays dominieren den Markt nicht emittierender Displays. Lag der Anteil der LEDs als Lichtquelle für Displays im Jahr 2011 noch bei 57 %, stieg dieser bis ins Jahr 2016 auf 96 %. Für das Jahr 2020 wird prognostiziert, dass annähernd 100 % der BLUs nicht emittierender Displays LEDs sind (McKinsey 2011).

2.4.1 Farbmodelle und Gamut

Während zur Beschreibung der Wahrnehmung und optischen Messung von Farben das CIE Farbsystem verwendet wird, benutzen Displays zur Darstellung von Informationen in den meisten Fällen das RGB-System (Blankenbach 2016a; Westland 2016). Das RGB-System basiert auf der additiven Mischung der Primärfarben Rot, Grün und Blau, die abhängig des jeweiligen Anzeigerätes einen unterschiedlichen Farbeindruck erzeugen. Zur geräteübergreifenden Definition von standardisierten Farbräumen im RGB-System, werden einheitliche Eckpunkte im CIE-Farbsystem beschrieben und international festgelegt (Westland 2016). Zu nennen ist dabei der ITU-R BT.709 (International Telecommunication Union 2015-06-01), der die Transferfunktion (Gammakurve) des HDTV-Standard beinhaltet und die Koordinaten des sRGB-Farbraum. Abbildung 2.10 zeigt den normalisierten (relative Werte von 0 bis 1) RGB-Farbraum, der durch die drei Primärfarben aufgespannt wird. Die RGB-Werte werden in Displays mit digitaler Bildverarbeitung, beispielsweise diskret mit 8 Bit (256) oder 10 Bit (1024) quantisiert von einem Display dargestellt. Volles Weiß wird angezeigt, wenn alle Primärfarben auf maximalen Niveau sind.

Ein Display mit jeweils 8 Bit für jede Primärfarbe kann somit $2^8 * 2^8 * 2^8 = 2^{24} = 16\,777\,216$ Farben darstellen. Dementsprechend kann ein Display mit 10 Bit $2^{30} = 1\,073\,741\,824$ Farben darstellen.

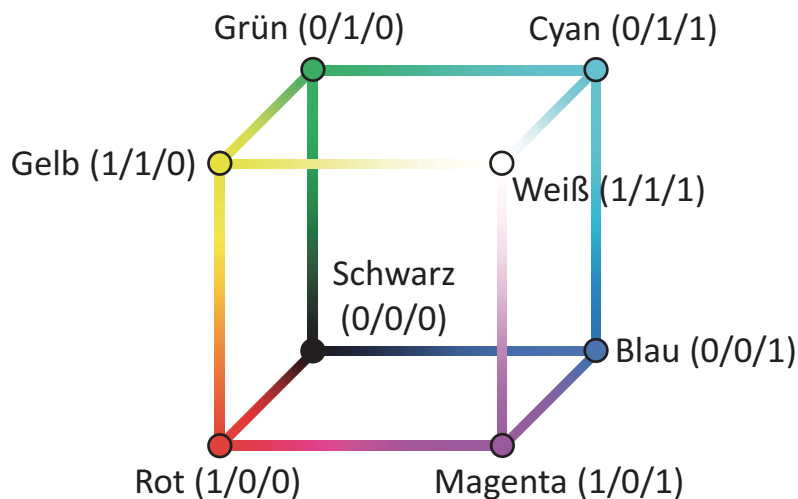


Abbildung 2.10: Normalisierter RGB-Farbraum

Es existieren weitere Farbmodelle, beispielsweise der HSB Farbraum (Farbwert (Hue), Farbsättigung (Saturation), Hellwert (Brightness)) und der HSV Farbraum (Hue, Saturation, Value), die in der Computergrafik angewendet werden und direkt in einen RGB-Wert umgerechnet werden können (Green und MacDonald 2002). In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem RGB-Farbraum, in dem das Eingangssignal eines Displays beschrieben wird. Weitere Farbmodelle wie die bereits aufgeführten werden nicht betrachtet.

Die Beziehung zwischen den RGB-Farbwerten und dem Tristimulus XYZ kann als lineares System nach 2.16 dargestellt werden (Blankenbach 2016a; Green und MacDonald 2002).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R^\gamma \\ G^\gamma \\ B^\gamma \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Die Matrix mit den Tristimulus Werten X_i , Y_i und Z_i beinhaltet die Tristimulus Werte der jeweiligen Primärfarbe. Die Werte Y_R , Y_G und Y_B repräsentieren die Helligkeit des Weißpunktes. In der Potenz der RGB-Werte wird der Gamma-Wert (Kapitel 2.4.2) des Displays in die Gleichung integriert.

Der **Gamut** eines Anzeigerätes umfasst die Menge aller Farben, die ein Anzeigegerät, beispielsweise ein Display, darstellen kann (Green und MacDonald 2002). Der Gamut umfasst den Geräte-Farbraum, der durch die Koordinaten der Primärfarborborte eine Fläche abgrenzt, beispielsweise ein Dreieck des sRGB-Gamut in Abbildung 2.7.

2.4.2 Charakterisierung von Displays

Zur Charakterisierung farbggebender Displaysysteme wird ein Model zur Beziehung zwischen den Farbkoordinaten des Displaysystems und der CIE-Farbmatrik erstellt. Nach Green (Green und MacDonald 2002) gibt es drei grundlegende Ansätze zur Generierung dieser Beziehung und zur Beschreibung des Displaysystems:

1. Das **physikalische Modell** oder Farbmischungs-Modell beschreibt die physikalischen Eigenschaften der Geräte anhand von Größen wie Absorption, Lichtbrechung und Reflexion von Farbfiltern und Oberflächen.
2. Das **numerische Modell** wird durch eine Reihe von Koeffizienten definiert, die aus einem Satz bekannter Proben gemessen werden. Das physikalische Verhalten der zugehörigen Medien muss nicht bekannt sein. Detailliert wird das numerische Modell in Anhang B.1 beschrieben.
3. **Lookup-Tabellen**, die im Allgemeinen eine Zuordnungstabelle für nichtlineare und komplexe Funktionen sind, werden bei Displaysystemen zur Beschreibung der Umwandlung zwischen einem Gerät und einem Ziel-Farbraum angewendet. Die Einträge der Lookup-Tabellen werden entweder durch Messungen oder durch physikalische oder numerische Modelle bestimmt. Die Zwischenwerte der Koordinaten werden interpoliert.

Zur optischen Vermessung der visuellen Eigenschaften von Displaysystemen werden in dieser Arbeit folgende Messgrößen verwendet und nachfolgend definiert. Die Leuchtdichte, der Kontrast, der Farbort und die Farbtemperatur, die Homogenität der Ausleuchtung, die Farbdifferenz, die Gammakorrektur und dominante Wellenlänge. Die Durchführung der Messungen richten sich nach dem „Information Display Measurements Standard“, herausgegeben vom „International Committee for Display Metrology“ (ICDM) (Kelley 2011; Society for Information Display 2012). Details dazu sind in Anhang B zu finden.

Leuchtdichte (L_v)

Die Leuchtdichte L_v ist der orts- und richtungsabhängige Lichtstrom einer Lichtquelle und wird nach Formel 2.17 berechnet. Die Leuchtdichte einer Fläche bestimmt die wahrgenommene Helligkeit der Fläche.

$$L_v = \frac{d\phi}{dA \cos\vartheta d\Omega} \quad (2.17)$$

mit $d\phi$, dem Lichtstrom, der sich mit dem Raumwinkel $d\Omega$ ausbreitet. dA ist die Querschnittsfläche des ausbreitenden Lichtbündels und ϑ der Winkel zwischen der Normalen der Querschnittsfläche und der Richtung des Bündels (Deutsches Institut für Normung e.V. 2018-12-01).

Kontrast

Der Kontrast eines Displays ist das Verhältnis des Weißwertes zum Schwarzwert. In dieser Arbeit wird der Signalkontrast C_S nach Formel 2.18 verwendet. Dabei wird die Leuchtdichte des weißen Bildsignals $L_{v,W}$ durch die Leuchtdichte des schwarzen Bildsignals $L_{v,K}$ geteilt (Society for Information Display 2012).

$$C_S = \frac{L_{v,W}}{L_{v,K}} \quad (2.18)$$

Farbort und Farbtemperatur

Der Farbort wird mit den Koordinaten entsprechend des gewählten Farbraumes nach Kapitel 2.3 angegeben. Die gemessene Farbtemperatur wird, wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben, in K angegeben.

Homogenität der Ausleuchtung

Die Gleichmäßigkeit der Bildschirmausleuchtung wird durch das Verhältnis der minimalen Leuchtdichte zur maximalen Leuchtdichte nach Gleichung 2.19 bestimmt. Üblicherweise wird an neun definierten Positionen auf dem Display die Leuchtdichte gemessen. Die Positionen sind im Information Display Measurements Standard der SID zu finden (Society for Information Display 2012).

$$UR = 100 \frac{L_{min}}{L_{max}} \quad (2.19)$$

Eine Homogenität von $>80\%$ wird für ein LCD als gut angesehen (Boyd 2016a; Hong 2009).

Farbdifferenz

Die Farbgleichmäßigkeit bezieht sich darauf, wie gut die Farbe über der Displayoberfläche konstant bleibt. Umgekehrt wird die Ungleichförmigkeit einer Farbe dadurch charakterisiert, wie sie sich über die Displayfläche ändert. Die Ungleichförmigkeit der Farben wird durch die maximale Farbdifferenz $\Delta u'v'$ zwischen zwei beliebigen Punkten auf dem Display spezifiziert (Society for Information Display 2012). Die Formel der Farbdifferenz leitet sich aus ΔE nach 2.14 ab, indem der Wert der Leuchtdichte L nicht berücksichtigt wird.

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2} \quad (2.20)$$

wobei u'_1, v'_1 und u'_2, v'_2 die Farbkoordinaten zweier beliebiger Punkte im CIELUV-Farbsystem sind.

Gamma (Gammakorrektur)

Die menschliche Wahrnehmung der Helligkeit ist nicht linear. Stevens beschreibt mit seiner Potenzfunktion (Stevenssche Potenzfunktion) den Zusammenhang zwischen der Empfindungsstärke und der visuellen Reizstärke als logarithmische Beziehung. Für die Helligkeit eines dunkeladaptierten Auges ist der Exponent $n \approx 0,33$ (Stevens 1957). Dies bedeutet, die wahrgenommene Helligkeit steigt im Hellen weniger steil und im Dunklen steiler an.

Der Bildinhalt eines Displays wird mit Hilfe der Farbpixel des LCP dargestellt. Zwischen der maximalen Helligkeit und dem Schwarzwert jedes Pixels werden die digitalen Eingangsdaten D_R, D_G und D_B mit N Bits in „Graustufen“ zerteilt. Soll in einem Display die Helligkeit linear mit den digitalen Eingangsdaten ansteigen, muss die logarithmische Helligkeitswahrnehmung des menschlichen Auges ausgeglichen werden. Dies wird als **Gammakorrektur** bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen den digitalen Eingangsdaten eines Bildes und der Helligkeit des Displays wird nach Gleichung 2.21 berechnet. Ein typischer Gammawert für ein LCD ist $\gamma = 2,3$ (Blankenbach 2016b)

$$I_{Input} = I_{Output}^\gamma \quad (2.21)$$

mit $0 \leq I_{Input} \leq 1$ und $0 \leq I_{Output} \leq 1$.

Zu Recht heben Chorin et al. hervor, dass eine Vergrößerung des Farbumfangs eines Displays zu Konsequenzen für die Nutzung von Eingangsdaten in digitalisierter Form mit einer festen Anzahl von Bits pro Kanal hat. Bei der gleichen Anzahl von Datenpunkten erhöht sich der durchschnittliche Farbabstand zwischen benachbarten Datenpunkten. Die Folge ist ein erhöhtes Bildrauschen (Chorin et al. 2007).

Dominante Wellenlänge λ_d

Nach der CIE-Definition beschreibt die **Dominante Wellenlänge**, die Wellenlänge des monochromatischen wahrgenommenen Stimulus, die durch eine polychromatische Lichtmischung erzeugt wird (Schanda 2007). Die dominante Wellenlänge kann in den CIE-Farbräumen geometrisch bestimmt werden. Hierzu wird vom Weißpunkt W eine Verbindungslinie zum Farbort der Probe gezogen und diese Verbindungslinie bis zum Rand des Farbraumes verlängert. Der

Schnittpunkt mit dem Rand des Farbraumes (Spektralfarbenzug) entspricht der Wellenlänge der dominanten Wellenlänge.

2.4.3 Berechnung der Gamut-Fläche

Im CIELUV-System wird ein auf RGB basierender Farbraum als Dreieck mit den jeweiligen u' und v' Koordinaten dargestellt. Dieses Dreieck kann als prozentuale Fläche des gesamten wahrnehmbaren Farbraumes nach Gleichung 2.22 berechnet werden (Blankenbach 2016a).

$$A = 256,1 [(u'_R - u'_B)(v'_G - v'_B) - (u'_G - u'_B)(v'_R - v'_B)] \quad (2.22)$$

2.4.4 Farbwahrnehmung in Displays

Im Jahr 2007 beschreibt Vaan unterschiedliche Displaytechnologien zur Verbesserung der Bildqualität. Er zeigt auf, dass durch die Expansion des Produktionsvolumens und sinkenden Kosten der Displayproduktion eine Verbesserung der Bildqualität von Displays zu erwarten ist. Durch neue Phosphormaterialien bei LCDs mit LED-Hintergrundbeleuchtung wird sich der darstellbare Farbraum vergrößern (Vaan, A. J. S. M. de 2007).

Fedorovskaya et al. untersuchen die Farbwahrnehmung von Displays anhand eines Experiments mit fünf Probanden. Ziel war die Bewertung der Bildinhalte anhand deren erlebter Natürlichkeit, der Farbigkeit und der Qualität. Dazu wurde ein Set aus 84 Bildern pixelweise in der Farbsättigung verändert und vier Mal den Probanden gezeigt. Den Autoren zufolge ist die Beurteilung der Natürlichkeit ein Vergleichen zwischen dem Ausgangssignal der visuellen Bildverarbeitung im Gehirn und einer inneren Referenz, einer Gedächtnisrepräsentation. Natürlichkeit entspricht den Vorstellungen und Erwartungen der Beobachter (Fedorovskaya et al. 1997).

Laird et al. untersuchen die Präferenz der Beobachter für die Farbsättigung im Zusammenhang mit natürlichen Bildinhalten. Es werden die Gamut-Grenzen für natürliche Bildinhalte definiert. 32 farbnormale Probanden betrachteten Bilder auf einem 42 Zoll Display mit 250 cd/m^2 und wählten ihr bevorzugtes Bild. Es konnte aufgezeigt werden, dass die meisten Probanden Bilder mit 90 % des Gesamt-Gamuts wählten (Laird und Heynderickx 2008).

Sakurai et al. untersuchen mit zwei psychometrischen⁷ Experimenten die Veränderung des Farbumfangs und der Farbigkeit von Displays. Zehn farbige Testbilder werden im Farbumfang reduziert (Faktor 1, 0,8, 0,6 und 0,4) und mit einem Display mit erweitertem Farbraum

⁷Psychometrie ist ein Gebiet der Psychologie, das sich mit den Methoden des psychologischen Messens befasst.

(BT.709) betrachtet. Abhängig von der gezeigten Szene wurden die Bilder mit dem 0,8–1-fachen Farbumfang des Displays bevorzugt (Sakurai et al. 2008).

Chen et al. zeigten in einer theoretischen Betrachtung eines LCDs mit LED-Beleuchtung, die eine 1 nm Halbwertsbreite (FWHM) besitzen, kann 93,5 % des Rec. 2020 Farbraumes (International Telecommunication Union 2015-10-01) erreicht werden (Chen et al. 2017).

Schanda gibt als Wert der Farberinnerung an: Ein Zeitunterschied von 15 Sekunden führt zu einem Farbunterschied bis zu $\Delta E_{ab} = 5$ zwischen der gesehenen und der erinnerten Farbe. Dieser Unterschied nimmt langsam mit der Zeit zu (Schanda 2007).

2.4.5 Displays mit mehreren Primärfarben

Displaysysteme mit mehreren Primärfarben werden als „Multi-Primary Displays“ (MPD) bezeichnet. In diesen werden zur Erzeugung der Bildinhalte mehr Farben als Rot, Grün und Blau verwendet. Die Motivation für diese Displays ist darauf zurückzuführen, Anzeigesysteme mit einem deutlich größeren Farbraum als sRGB zu erstellen, um die Bildinhalte farblich identisch mit realen Objekten darzustellen (Anandan 2006; Eliav et al. 2006; Hill 1999; Long und Fairchild 2011; Sugiura 2009; Teragawa et al. 2012). Displays mit vier, fünf oder sechs Primärfarben wurden bereits beschrieben (Chan et al. 2007; Roth und Caldwell 2005; Sugiura 2009; Sugiura et al. 2005; Teragawa et al. 2012; Ueki et al. 2009; Yang et al. 2005). Um ein auf LCD-basierendes MPD zu realisieren, werden typischerweise zwei Methoden angewendet. In der ersten Methode wird die Anzahl der Primärfarben in der BLU erhöht, beispielsweise durch mehrere LEDs. Die zweite Methode basiert auf der Erhöhung der Subpixel im LCP bei einer Hintergrundbeleuchtung mit breitem Farbspektrum (Chan et al. 2007). Alle MPD vereint die Umrechnung des Eingangssignals des Displays, basierend auf dem RGB-Farbraum, auf dem darzustellenden Farbraum des Anzeigepaneels. Hierzu werden eine Vielzahl von Methoden und Optimierungen aufgezeigt (Ajito et al. 2000, 2001; Centore und Brill 2012; Chan et al. 2007; Chorin und Eliav 2007; Hill 2001; Lebowsky und Vonnelich 2008; Murakami et al. 2004).

Marimont und Wandell zeigen eine Methode zur Umrechnung wellenlängen abhängiger optischer Übertragungsfunktionen (OTF) in Displays. Damit können Farbübereinstimmungen bei unterschiedlichen Primärfarben erzielt werden. Die Autoren zeigen auf, dass in der üblichen Farbmessung die Umrechnung mittels einer 3 x 3 Matrix zur Übereinstimmung zweier Farbbilder über zwei emissive Displays durchgeführt werden kann (Marimont und Wandell 1994).

Sugiura et al. entwickeln ein Sechs-Primärfarben-LCD mit jeweils zwei roten, zwei grünen und zwei blauen LEDs ($R_x(x/y)$ in CIE 1931 Normfarbtafel; R1(0,6821/0,3075); R2(0,6640/0,3215);

G1(0,1309/0,5803); G2(0,2906/0,6656); B1(0,1117/0,1731); B2(0,1536/0,0604)). Der erreichte Farbumfang des Displays ist bei 175 % des sRGB-Farbumfangs. In Bezug auf den Munsell-Farbraum werden mit dem Sechs-Primärfarben-LCD 95,58 % erreicht. Vergleichend dazu erreicht ein LCD-Display mit drei Primärfarben bis zu 80,6 % des sRGB-Farbraumes. Dies entspricht 52,67 % des Munsell-Farbraumes (Sugiura 2009). Zur Berechnung des Tristimulus des MPD verwenden Sugiura et al. die Matrix zur Charakterisierung von Displays und addieren die beiden Charakterisierungs-Matrizen der jeweiligen RGB-Primärfarben nach 2.23 (Sugiura et al. 2005, 2006).

$$\begin{bmatrix} X_F \\ Y_F \\ Z_F \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1 \begin{bmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{bmatrix} + \mathbf{A}_2 \begin{bmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Ein grundlegendes Problem von MPD mit N -Primärfarben ist die Entstehung von **Bildschirm-Metamerie**. In der Linearkombination nach Gleichung 2.23 ist es im Allgemeinen möglich, dass ein identischer Tristimulus aus unterschiedlichen RGB-Kombinationen entsteht. Demzufolge ist die Zuordnung der RGB-Signale zu den dargestellten Farben nicht eindeutig. Bildschirm-Metamerie kann nur vermieden werden, wenn jeweils nur ein RGB-Dreieck aufgespannt wird (Brill und Larimer 2005b, 2007). In der Literatur werden diverse Ansätze zur Minimierung der Bildschirm-Metamerie in MPD diskutiert (Ajito et al. 1999, 2000, 2001; Brill und Larimer 2005a; Koenig et al. 2001; Yamaguchi et al. 2001).

2.4.6 Metamerie in Displays

Ein Drei-Farben Display (Trichromatisches Displays) mit den Primärfarben Rot, Grün und Blau verhindert Beleuchtungsmetamerie, da der Farbraum ein RGB-Dreieck aufspannt und es eine eindeutige Zuordnung jedes RGB-Wertes zu einem Tristimulus gibt. Für ein Display mit mehreren Primärfarben ist keine eindeutige Zuordnung eines RGB-Eingangssignals zu einem definierten Tristimulus möglich. Identische Tristimulus-Werte aus unterschiedlichen Kombinationen der verschiedenen Primärfarben sind möglich. Metamere können dabei verhindert werden, wenn immer nur drei Farben aktiv sind (Brill und Larimer 2007). Jedoch ist es mit Drei-Farben-Displays unmöglich, für jeden Nutzer ein einzigartigen Tristimuluswert zu erzeugen (Murakami et al. 2004).

Fairchild et al. zeigen auf, dass Displaysysteme mit schmalbandigen Primärfarben ein größeres Potential für Beobachter-Metamerie aufweisen als Displays mit breitbandigem Spektrum (>10 zu 4 CIELAB Einheiten). Die Autoren empfehlen daher für die Herstellung von Displays trotz des Potenzials und der Vorteile eines großen Farbraumes, den Verzicht auf schmalbandige Primärfarben für Displays in farbkritischen Anwendungen (Fairchild und Wyble 2007).

Alfvin et al. zeigen in einem Experiment mit 20 Teilnehmern die Varianz der Beobachervariabilität der Beobachter-Metamerie. Ein einzelner Beobachter wiederholte das Experiment 20-mal, um die Intra-Beobachter-Variabilität zu schätzen. Ziel des Experimentes war die Abschätzung der Genauigkeit von drei Sätzen an Farbanpassungsfunktionen; den 1931 CIE 2° Standardbeobachter, den 1964 10° Beobachter und den 1955 Stiles-Burch 10° Beobachter. Im Durchschnitt betrug die Unterschiede zwischen zwei verschiedenen Beobachtern etwa 2,5 CIELAB-Einheiten. Die experimentell ermittelten Bereiche der Intra- und Inter-Beobachter-Farbfelanpassung waren signifikant größer als die aus CIE-Empfehlungen zur Beobachtungs-Metamerie berechneten Farbabweichungsbereiche (Alfvin und Fairchild 1997).

Asano et al. berichten über ein Experiment mit 58 farbnormalen Probanden. Ziel ist die Bewertung der Farbdifferenz nach den Angaben der Autoren mit vier fast metameren Spektrenpaaren ($\Delta E_{00} = 0,5/3,0/2,4/1,7$) mit Hilfe eines Vier-Primärfarben-Displays (SHARP Quattron Display). Im Ergebnis kann gezeigt werden, dass die Varianz zwischen den Probanden größer ist als in den CIE-Normspektralwertfunktionen von 2006 vorhergesagt (Asano et al. 2013).

Ramanath zeigt auf, dass Beobachter-Metamerie in derzeit verfügbaren Display-Produkten ein erhebliches Problem darstellt. Der Autor empfiehlt, Beobachtungs-Metamerie sollte in Display-Systemen minimiert werden durch eine Maximierung der FWHM (Ramanath 2009). Brill et al. zeigen auf, wie Bildschirm-Metamerie in Display-Systemen mit N -Primärfarben vermieden werden kann (Brill und Larimer 2005a).

2.4.7 Displays mit gezielter Steuerung des Blaulichtanteils

Diverse Hersteller bieten Displays an, die gezielt den Blaulichtanteil reduzieren. Dabei werden unterschiedliche Termini und Motivationen zur Reduzierung des Blaulichtanteils genannt:

Die Firma Apple Inc. hat für seine Mobilgeräte ab der Betriebssystemversion iOS 9.3 und deren Computer ab der Betriebssystemversion macOS Sierra 10.12.4 den „Night Shift Modus“ eingeführt (Apple 2016). Apple war einer der ersten Hersteller von Anzeigegeräten, dessen Motivation für die Reduzierung des Blaulichtanteils in der Regulierung des „inneren Rhythmus“ lag.

Eine Software zur Anpassung der Displayfarbe an die Tageszeit ist f.lux, die bereits seit 2008 existiert (Flux Software LLC 2018). Microsoft hat seit Windows 10 Creators Update (Redstone 2, Version 17, Build 15063) den Nachtmodus zur Reduzierung des Blaulichtanteils eingeführt (Microsoft 2017).

Die Reduzierung des Blaulichtanteils bewerben die Hersteller von Computerbildschirmen unterschiedlich: ASUS bezeichnet seine System als „Eye Care Technologie“ und verwenden dies als Oberbegriff für mehrere ergonomische Eigenschaften. Neben der „Flicker-Free“ Eigenschaft, der Reduzierung des Flimmerns und der Reduzierung des Computer Vision Syndrome (CVS)⁸ gibt es die „Ultra-low Blue Light Technology“. Anwender können in fünf Filterstufen je nach Bildschirmtätigkeit und Umgebungslicht den Blaulichtanteil um bis zu 70 % verringern (ASUS 2015). ViewSonic bietet einen „Blue Light Filter“ an, der mit 100 Stufen den Blaulichtanteil bis zu einer Reduktion des ursprünglichen blauen Spektrums um 87 % verringern kann. Das Unternehmen verspricht eine farbentreue Darstellung durch eine „RGB-3-Achsen-Anpassung“ (ViewSonic 2015). BenQ bezeichnet seine Methode als „Eye-Care-Technologie“. Dieser soll ebenfalls eine flimmerfreie Darstellung und eine Reduzierung des Blaulichtanteils („Low Blue Light“) ermöglichen (BenQ 2013). Philips bezeichnet sein System als „SoftBlue Technologie“. Hierbei wird eine Lichtquelle gewählt, die einen Peak im Blaubereich bei 460 nm besitzt. Ursprünglich wurde ein Peak bei 450 nm verwendet. Die Darstellung von Farbe oder Bilder soll laut Unternehmen nicht beeinträchtigt werden (Philips 2015). Samsung zeigt mit dem „Eye Saver-Modus“ eine Möglichkeit zur Reduktion der Blaulicht-Emissionen. Diese soll vor Schäden der Netzhaut schützen (SAMSUNG 2015). Fujitsu bietet in neueren Displays eine „Low-Blue-Light“ Option an (Fujitsu 2018). Diese erfüllen ebenso wie die ASUS Modelle das TÜV Rheinland Zertifikat „Low Blue Light Testing Standard for Monitors“ (TÜV Rheinland 2015).

Die aufgelisteten Verfahren zur Reduktion des Blaulichtanteils in Displays basieren allesamt auf einer softwaregesteuerten Veränderung der angezeigten Bildinhalte durch unterschiedliche Mischung der roten, grünen und blauen Pixel des Anzeigepanels. Die Hinterleuchtung dieser Monitore kann im Gesamten gedimmt werden, um die Helligkeit des Displays zu steuern, ohne auf dessen spektrale Zusammensetzung einzuwirken.

2.4.8 Displays mit variablem Farbspektrum

Aktuell sind zwei Methoden der Displaybeleuchtung bekannt, die gezielt die spektrale Zusammensetzung verändern, um einen Effekt auf das menschliche zirkadiane System auszuüben.

Erstens das im Patent WO 2010/072415 A1 beschriebene Displaysystem mit zirkadianer Wirkung auf den Menschen (Bues et al. 2010; Stefani et al. 2010b). Die im Patent aufgezeigte Methode des zirkadian wirksamen Displays (CwD) ist Grundlage dieser Arbeit. In Kapitel 4 wird aus den Defiziten im Stand der Forschung und Praxis sowie der im Patent beschriebenen Methode der eigene Ansatz dieser Arbeit entwickelt.

⁸Computer Vision Syndrome(CVS) bezeichnet einen Ermüdungsprozess des Auges nach langem Arbeiten an einem Display (Blehm et al. 2005).

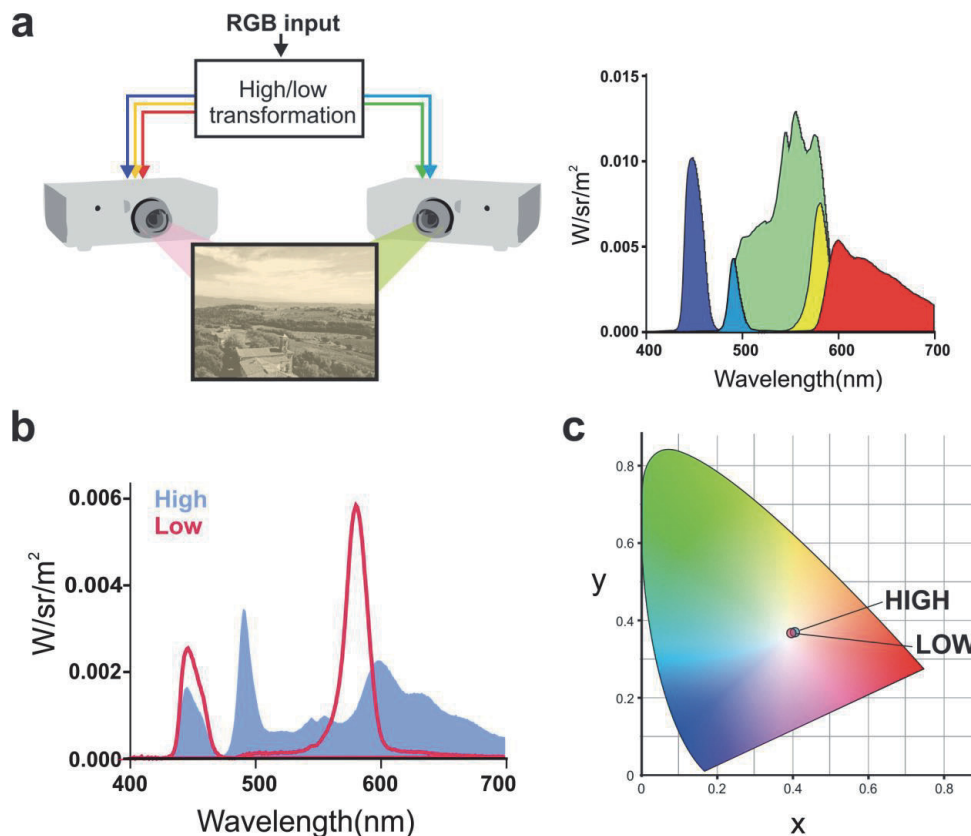


Abbildung 2.11: Darstellung des Projektionssystems, der Lichtspektren und der gemeinsamen Farborte aus Allen et al. (Allen et al. 2018)

Das zweite bekannte Verfahren zur Veränderung der spektralen Zusammensetzung eines Anzeigergeräts wird im Patent WO 2017/137756 A1 dargestellt (Lucas und Allen 2017). Die Autoren beschreiben ein projektionsbasiertes Displaysystem, das mit zwei Projektoren vier Primärfarben erzeugt. Der erste Projektor besitzt einen Kerbfilter (Magenta: $463/571\text{ nm}$) und der zweite Projektor besitzt einen Bandpassfilter (Grün: $484/604\text{ nm}$). Die Primärfarben sind Violett ($410\text{--}470\text{ nm}$), Cyan ($470\text{--}540\text{ nm}$), Gelb ($520\text{--}610\text{ nm}$) und Rot ($580\text{--}700\text{ nm}$). Die Peak-Wellenlängen des ersten Farbraumes sollen in folgenden Regionen liegen: Violett ($430\text{--}470\text{ nm}$), Cyan ($470\text{--}510\text{ nm}$), Gelb ($560\text{--}610\text{ nm}$) und Rot ($580\text{--}700\text{ nm}$). Der zweite Farbraum soll folgende Peak-Wellenlängen und Eigenschaften besitzen: Zwei Peaks bei Cyan oder Grün ($<520\text{ nm}$) mit einer Lücke zwischen $440\text{--}480\text{ nm}$. Abbildung 2.11 zeigt die Lichtspektren und die beiden Farborte aus der Veröffentlichung von Allen et al. mit einer gemessenen Leuchtdichte des projizierten Bildes von 79 cd/m^2 (Allen et al. 2018). Zur Verarbeitung der Bilddaten wird eine Meta-Helligkeit eingeführt. Diese wird in die Umrechnung zwischen den beiden Farbräumen der unterschiedlichen Lichtspektren integriert. Aus einem RGB- oder XYZ-Farbraum wird mithilfe der Meta-Helligkeit M folgende Umrechnung durchgeführt:

$$\begin{aligned}
 X &= v_i k_v V(X) + c_i k_c C(X) + r_i k_r R(X) + y_i k_y Y(X) \\
 Y &= v_i k_v V(Y) + c_i k_c C(Y) + r_i k_r R(Y) + y_i k_y Y(Y) \\
 Z &= v_i k_v V(Z) + c_i k_c C(Z) + r_i k_r R(Z) + y_i k_y Y(Z) \\
 M &= v_i k_v V(M) + c_i k_c C(M) + r_i k_r R(M) + y_i k_y Y(M)
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

wobei v_i , c_i , r_i und y_i die Ausgänge der Primärfarben sind mit den digitalen Werten 0–255 und k_v , k_c , k_r und k_y die Gammakorrektur des jeweiligen Kanals ist. Die Funktionen V , C , R und Y lassen sich mit den jeweiligen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der Primärfarben nach folgendem Muster berechnen: $V(X) = \int Q_V(\lambda)X(\lambda)d(\lambda)$; $C(X) = \int Q_C(\lambda)X(\lambda)d(\lambda)$ usw.

Es existieren weitere Systeme, die anhand multispektraler Beleuchtung die Systemantwort der Photorezeptoren untersuchen: Cao et al. verwenden einen Photostimulator mit fünf LEDs als Primärfarben zur Stimulation einzelner Photorezeptoren und zur Untersuchung der „Silent Substitution“-Methode (Cao et al. 2015). Der Photostimulator ist kein bildgebendes Anzeigesystem und wird hier zur Vervollständigung von Systemen mit variablem Farbspektrum angegeben. Mit der „Silent Substitution“-Methode kann die Wahrnehmung metamerer Spektren anhand der elektrischen Aktivität der einzelnen Photorezeptoren untersucht werden. Details dazu befinden sich in Anhang A.4.

2.5 Nicht-visuelle Wirkung von Licht auf den Menschen

Kapitel 2.2.1 beschreibt den Aufbau des Auges, der Rezeptoren und der Verschaltung dieser im Gehirn. Die ipRGCs sind direkt mit dem SCN verbunden, der im Hypothalamus (Teil des Zwischenhirn) liegt. Der SCN wird auch als Master-Zeitgeber oder endogener Schrittmacher (engl. *pacemaker*) bezeichnet. Dieser zentrale Schlaf-Wach-Oszillator übernimmt die weitere Reizverarbeitung und die Steuerung der Melatoninausschüttung. Melatonin, das auch als Nachthormon bezeichnet wird, ist ein Neurotransmitter und wird in der Zirbeldrüse produziert. Geringe Anteile von Melatonin werden auch in der Netzhaut und im Darm produziert. Melatonin ist der wichtigste Akteur in der nächtlichen Regulierung vieler physiologischer Körperfunktionen (Tosini und Iuvone 2014): Es reguliert den Schlaf-Wach-Rhythmus, wirkt als Immunstimulator (Hardeland et al. 2006) und hat durch seine antioxidative Wirkung eine zellschützende Eigenschaft (Bonfont-Rousselot und Collin 2010; Hardeland et al. 2006; Reiter et al. 2002; Rodriguez et al. 2004). Bonfont-Rousselot et al. vermuten, dass Melatonin den Alterungsprozesses verlangsamt, da Alterung hauptsächlich durch Schädigung der Zellen durch oxidativen Stress entsteht (Bonfont-Rousselot und Collin 2010).

Licht am Abend und in der Nacht hemmt die Produktion von Melatonin (Lewy et al. 1980). Besonders Wellenlängen zwischen 446 nm und 483 nm unterdrücken die Melatoninausschüttung in diesem nicht-optischen System (engl. non-image forming-System) der ipRGCs (Brainard et al. 2001; Lucas et al. 2001; Thapan et al. 2001). Der maximale Effekt der Melatoninunterdrückung wird erreicht durch monochromatisches Licht mit einer Wellenlänge von 464 nm (Brainard et al. 2001). Das Photopigment Melanopsin hat die maximale Lichtempfindlichkeit bei 480 nm (Lucas et al. 2014).

Melatonin trägt zur Festigung von Gedächtnisinhalten während der Schlafphase bei und es hat einen positiven Effekt auf das Lernen (Fernandez et al. 2018; Larson et al. 2006; Wang et al. 2005). Aktuelle Forschungen zeigen den Beitrag der ipRGCs zur visuellen und emotionalen Wahrnehmung (Allen et al. 2017; Amano et al. 2017; Ecker et al. 2010; Fernandez et al. 2018; Schmidt et al. 2014; Semo et al. 2010; Stinchcombe et al. 2017). Der Beitrag der ipRGCs zur Wahrnehmung und zur Gedächtnisleistung wird in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

2.5.1 Zirkadianer Rhythmus

Der Begriff zirkadian (circadian) setzt sich aus den lateinischen Worten „circa“ für ungefähr und „dies“ für Tag zusammen. Der zirkadiane Rhythmus beschreibt wörtlich den 24-stündigen Tag-Nacht-Wechsel (Halberg 1959; Halberg et al. 2003). In der Chronobiologie werden darüber hinaus weitere Rhythmen unterschieden, wie der infradiane und ultradiane Rhythmus.

Zirkadiane Rhythmen

Jacques d'Ortous de Mairan beschreibt 1729 in seinen Experimenten den zirkadianen Rhythmus in Pflanzen. Das tägliche rhythmische Öffnen und Schließen der Blätter funktioniert auch ohne Sonnenlicht, lautet seine Schlussfolgerung (Daan 2010). Konopka und Benzer entdecken 1971 den Einfluss der Gene auf die innere Uhr durch Experimente mit Fliegen (Konopka und Benzer 1971). In einem Bunker-Experiment des Max-Planck-Instituts konnte 1974 das Auseinanderdriften des menschlichen zirkadianen Rhythmus über mehrere Wochen bei Abwesenheit äußerer Reize wie beispielsweise Tageslicht aufgezeigt werden. Sowohl die Körperkerntemperatur als auch der Schlaf-Wach-Rhythmus waren bei den Probanden im Durchschnitt bei 24,5 Stunden (Daan 2010; Jouvett et al. 1974). Czeisler beschreibt eine durchschnittliche Periodenlänge endogener Rhythmen von Melatonin, Cortisol und der Körperkerntemperatur von 24,18 Stunden (Czeisler et al. 1999). Die Konzentration von Melatonin im menschlichen Körper ist tagsüber niedrig (Tosini und Iuvone 2014).

Für den Menschen ist der wichtigste exogene (äußere) Zeitgeber zur Synchronisierung des zirkadianen Rhythmus der Hell-Dunkel-Zyklus des Tageslichts (Roenneberg et al. 2013). Diese Synchronisation der inneren Uhr, des zirkadianen Rhythmus, wird in der Chronobiologie als „Entrainment“ bezeichnet. Lichtexposition außerhalb der natürlichen Tag-Nacht-Wechsel desynchronisieren den zirkadianen Rhythmus (Duffy und Wright 2005; Roenneberg et al. 2003a, 2013; Wirz-Justice und Roenneberg 2013). Diese Störung des zirkadianen Rhythmus hat oxidativen Stress zur Folge, aus dem entzündliche Prozesse entstehen, welche die Grundlage für verschiedene Krankheiten des zentralen Nervensystems sein können. Arbeit in der Nacht mit Störung des zirkadianen Systems steht unter dem Verdacht, für die Entstehung von Krebs mitverantwortlich zu sein (Blask 2009; Blask et al. 1997; Cos et al. 2006; Erren et al. 2008; Kakizaki et al. 2008; Stevens 2006). Es ist nachgewiesen, dass physiologische Mengen an Melatonin das Wachstum von Brustkrebszellen *in vitro* hemmen (Blask et al. 1997). Scheer zeigt in seiner Arbeit einen Einfluss des Melatonins auf den nächtlichen Blutdruck. Bei Patienten mit Hypertonie konnte in der Nacht bei mehrfacher Gabe von Melatonin eine Reduzierung des Bluthochdrucks sowie eine Verbesserung der Schlafqualität gezeigt werden (Scheer, F. A. J. L. et al. 2004).

Im Jahr 1980 zeigen Lewy et al., dass bei einer Lichtexposition von 2 500 *lx* am Morgen für zwei Stunden zwischen 2:00 Uhr und 4:00 Uhr die Melatoninkonzentration innerhalb von 10 bis 20 Minuten absinkt und nach einer Stunde Tagesniveau erreicht. Laut Lewy werden mindestens 1 000 *lx* polychromatisches weißes Licht benötigt, um bei einem gesunden Menschen Melatonin zu unterdrücken (Lewy et al. 1980). Acht Jahre später zeigt Brainard mit einer Lichtquelle von 509 *nm* monochromatischem Licht bei einer Bestrahlungsstärke von 0,31 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, das 1,03 *lx* entspricht, eine signifikante Melatoninsuppression von 1,83%. Bei 1,6 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (5,5 *lx*) waren es 37,33%. Bei 13 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (44,66 *lx*) waren es 60,67% (Brainard et al. 1988).

An dieser Stelle muss folgende Eigenschaft der Messung von Beleuchtungsstärke dargestellt werden: Photometrische Bewertungen von Licht basieren, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, auf der spektralen Empfindlichkeitskurve der Photorezeptoren. Blaues Licht befindet sich am Rand der $V(\lambda)$ -Kurve. Wird monochromatisches blaues Licht in Lux angegeben, unterscheidet sich der Zahlenwert deutlich im Vergleich mit polychromatischem weißem Licht bei identischer Bestrahlungsstärke. Die Systemantwort der einzelnen Rezeptoren ist ebenfalls deutlich unterschiedlich. Ein Beispiel zur Verdeutlichung dieses Effektes ist in Anhang A.2.1 zu sehen. Diese Eigenschaft hat zur Folge, dass die Zahlenwerte der Beleuchtungsstärke in der unterschiedlichen Literatur fehlinterpretiert werden kann.

Die Wirkung eines Zeitgebers, besonders die des Lichts, hängt maßgeblich vom Expositionszeitpunkt ab. Am Tag reagiert die innere Uhr schwach auf Lichtreize. Zu Beginn der Nacht wird durch einen Lichtreiz die innere Uhr vorgestellt. Zum Ende der Nacht wird die innere Uhr durch einen Lichtreiz nachgestellt (Roenneberg 2004; Roenneberg et al. 2003a). Die absolute Sensiti-

vität des SCN variiert durch die photopische Stimulation während eines 24-Stundenzeitraumes (Rüger et al. 2006). Figueiro et al. zeigen eine höhere Melatoninsuppression kurz nach Mitternacht im Vergleich zu einer identischen Lichtexposition kurz vor Sonnenaufgang (Figueiro et al. 2005). Gronfier et al. belegen in einer Studie mit einer Leuchtstofflampe mit 4100 K gemessener Farbtemperatur, dass ab einer Beleuchtungsstärke von 100 lx bei den Probanden eine Verschiebung der zirkadianen Phase durch Messungen des Melatonins im Speichel erreicht wird (Gronfier et al. 2007). Dieser 100 lx Grenzwert wird auch von Zeitzer et al. bei nächtlicher Lichtexposition festgestellt. Ihnen zufolge wird bei niedrigen Beleuchtungsstärken unter 15 lx am Auge in der Nacht keine Phasenverschiebung des zirkadianen Systems verursacht. Ab 100 lx trat in dieser Studie eine Phasenverschiebung von 1,8 Stunden auf. Bereits ab ca. 500 lx waren es bereits 90 % der maximalen Phasenverschiebung von 3,2 Stunden, die bei 9100 lx erreicht werden (Zeitzer et al. 2000).

Ein Einflussfaktor auf den zirkadianen Rhythmus ist die sogenannte **Lichthistorie**. Dieser Begriff beschreibt die vorausgegangene Lichtexposition; beispielsweise des letzten Tag-Nacht-Zyklus. Lafrance et al. beschreiben ein Experiment mit sieben Probanden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen. Jeweils in der Nacht wurde eine vierstündige Schlafrestriktion bei der Exposition von hellem-weißen Licht am späten Vormittag zwischen 09:00 und 13:30 Uhr untersucht. Es konnte keine Melatoninunterdrückung nachgewiesen werden. Die Tagesvigilanz war leicht erhöht (subjektive Wachsamkeit: $F_{2,24} = 7,53, p = 0,003$) (Lafrance et al. 1998). Herbert et al. zeigen in einer Probandenstudie mit zwölf Teilnehmern den Einfluss von hellem Tageslicht auf die nächtliche Melatoninsuppression. Die Probanden waren jeweils einer Woche täglich mit durchschnittlich 4,3 Stunden hellem Tageslicht ausgesetzt. In der zweiten Woche trugen sie eine dunkle Schutzbrille mit 2 % Durchlässigkeit und waren durchschnittlich 1,4 Stunden pro Tag Tageslicht ausgesetzt. Nach der dunklen Woche war in der Nacht bei 500 lx Beleuchtungsstärke die Melatoninsuppression 53 % geringer; nach der hellen Woche nur 41 % (Hébert et al. 2002).

Rüger et al. zeigen die tageszeitabhängige Auswirkung von hellem Licht auf die menschliche Psychophysiologie: Zwölf junge männliche Probanden wurde entweder zwischen 12:00 Uhr mittags und 16:00 Uhr oder zwischen Mitternacht und 04:00 Uhr am Morgen entweder hellem Licht mit 5000 lx oder gedimmtem Licht mit 10 lx ausgesetzt. Helles Licht hatte eine zeitabhängige Wirkung auf die Herzfrequenz und Körperkerntemperatur; d. h. Belichtung mit hellem Licht in der Nacht, aber nicht tagsüber erhöhte die Herzfrequenz und die Körpertemperatur. Es gab keine signifikante Wirkung auf Cortisol. Die Wirkung von hellem Licht auf die psychologischen Variablen wie Schläfrigkeit und Ermüdung war zeitunabhängig. Sowohl in der Nacht als auch tagsüber reduzierte helles Licht die Schläfrigkeit und Ermüdung signifikant (Rüger et al. 2006). Figueiro et al. zeigen durch ein Experiment, bei dem 13 Probanden zwischen 07:00 und 17:00 Uhr mit 500 lx Tageslicht am Auges bestrahlt wurden, eine verbesserte Leistungsfähigkeit in der Nacht im Vergleich zu einer dunklen Beleuchtungssituation am Tag (Figueiro et al. 2014).

Studien haben gezeigt, dass Licht, das auf die untere Hälfte der Netzhaut fällt, die Melatoninausschüttung stärker unterdrückt als Licht, das auf die obere Netzhauthälfte fällt (Glickman et al. 2003; Lasko et al. 1999). Folglich wirkt Licht von oben, zum Beispiel die Sonne, der wolkenbedeckte Himmel oder Deckenbeleuchtung stärker auf den zirkadianen Rhythmus als Licht von unten. Dies bedingt das Prinzip der Lochkamera: Licht von oben trifft auf die untere Netzhauthälfte und die gleichmäßig verteilten ipRGCs in der Retina (Dacey et al. 2005). Darum wird die These vertreten, dass die ipRGCs im unteren Bereich der Retina empfindlicher auf Licht reagieren als die im oberen Bereich (Glickman et al. 2003; Lasko et al. 1999). Rüger zeigt auf, dass temporale Beleuchtung Melatonin weniger unterdrückt als nasale Beleuchtung (Rüger et al. 2005).

Infradiane Rhythmen

Außerhalb äquatorialer Regionen auf der Erde spielen saisonale rhythmische Effekte eine zusätzliche Rolle und bilden in der Chronobiologie eine eigenständige Rolle. Infradiane Rhythmen bezeichnen Schwingungen, die deutlich länger als einen Tag sind. Dies ist beispielsweise der Jahreszyklus mit ungefähr 365 Tagen. Saisonale rhythmische Effekte sind insbesondere bei Tieren erforscht. Die jahreszeitliche Veränderung der Tageslänge und Temperatur beeinflussen tiefgreifend die Physiologie und das Verhalten. Veränderungen des Stoffwechsels und daraus folgend eine Veränderung des Körpergewichtes, Fortpflanzung und Winterschlaf sind diesbezüglich zu nennen. Saisonale Effekte des menschlichen zirkadianen Rhythmus sind in dieser Form jedoch noch nicht hinreichend untersucht (Foster und Roenneberg 2008; Roenneberg et al. 2013).

Ultradiane Rhythmen

Ultradiane Rhythmen bezeichnen Schwingungen, die deutlich kürzer als ein Tag sind. Dies sind beispielsweise die Schlafstadien in einem REM-Non-REM-Zyklus. Ein Schlaf-Zyklus dauert dabei ungefähr 90 Minuten (Kramer und Merrow 2013; Parker et al. 1976). Stefani untersuchte die Wirkungsweise ultradianer Lichtwechsel auf die Wissensarbeit. Er zeigt auf, dass wahrnehmbare Lichtveränderungen mit Farbtemperatur und Helligkeitswechsel gegenüber statischem Licht bevorzugt werden (Stefani 2018-01-10).

2.5.2 Kategorisierung in Chronotypen

Der Begriff Chronotyp beschreibt die Kategorisierung der Menschen in Gruppen anhand ihrer zirkadianen Rhythmen. Drei Hauptgruppen werden unterschieden: „Lerchen“, der Frühtyp, „Eulen“, der Spättyp, und der Normaltyp. (Roenneberg und Foster 1997; Roenneberg et al. 2003b). Roenneberg et al. zeigen mithilfe des „Munich ChronoType Questionnaire“ (MCTQ), einem Fragebogen zur Bestimmung des Chronotyps, die Normalverteilung in der Bevölkerung bei der Eingruppierung und dass die meisten Menschen in Deutschland und der Schweiz ein Normaltyp sind.

Die Eingruppierung der Menschen in Früh- und Spättyp konnte bereits früher gezeigt werden. Bodenhausen beschreibt 1990, dass Menschen stereotype Vorurteile zu unterschiedlichen Tageszeiten in unterschiedlicher Ausprägungen äußern. Die Vorurteile waren deutlich ausgeprägter in den Morgenstunden bei Abendtypen und umgekehrt (Bodenhausen 1990). Studien zeigen, die Wirkung des Lichts auf den Menschen ist vom Chronotyp abhängig (Allebrandt et al. 2014; Chellappa et al. 2012; Maierova et al. 2016).

2.5.3 Aktivierung durch Licht

Ein weiterer nicht-visueller Effekt des Lichts ist die unmittelbare Steigerung der Aufmerksamkeit. Beim Menschen ist das Licht intuitiv mit einem Alarm- oder Wachzustand verbunden (Cajochen 2007). Campbell et al. weisen bei Arbeitern in einer acht Stunden Nachtschicht bei einer Beleuchtungsstärke von 1 000 lx ein signifikant höheres Wachheitsniveau nach als bei einer Beleuchtungsstärke von nur 100 lx . In der dunkleren Lichtumgebung war die Einschlafwahrscheinlichkeit um 83 % höher als in der hellen Umgebung (Campbell und Dawson 1990). Cajochen et al. ermitteln bei einem Vergleich der zwei Beleuchtungsstärken 9 100 lx und 100 lx eine Halbierung der Alarmreaktion bei 100 lx im Gegensatz zur maximalen Alarmreaktion bei 9 100 lx (Cajochen et al. 2000). Dieser Versuch zeigt, dass bereits bei einer üblichen Raumbelichtung von 100 lx eine nächtliche Aktivierung erfolgen kann.

Revell et al. beschreiben die akute Wirkung verschiedener kurzwelliger blauer (420 nm , 440 nm und 470 nm) sowie eines 600 nm Lichtpulses auf die subjektive Wachheit und die Melatoninunterdrückung. Es gab einen signifikanten Effekt der Dauer der Lichtexposition ($p < 0,001$) auf die Wachsamkeit. Im Vergleich zu 470 nm Licht waren die Wachsamkeitsniveaus im 420 nm Licht signifikant höher und im 600 nm Licht signifikant niedriger ($p < 0,05$). Diese Daten legen nahe, dass die subjektive Wachsamkeit für sehr kurzwelliges Licht maximal empfindlich sein kann (Revell et al. 2006).

Figueiro et al. belegen den nächtlichen Einfluss von blauem (470 nm) und rotem (630 nm) Licht auf die Aktivierung durch eine signifikant höhere Herzfrequenz. Bei vorheriger Dunkelheit über 60 Minuten konnte sowohl bei blauem als auch bei rotem Licht eine durch das EEG gemessene Aktivierung durch mehr Gehirnaktivitäten festgestellt werden. Die Leistungsfähigkeit und Schläfrigkeit wurden durch die Lichtbedingungen nicht beeinflusst. Einzig das blaue Licht verringerte den Melatoninspiegel (Figueiro et al. 2009).

Plitnick et al. bestätigen in einem Experiment die Wirkung nächtlicher Beleuchtung auf die Aktivierung. Die Wachsamkeit und Stimmung wurde bei den Probanden durch blaues und rotes Licht in der Nacht erhöht, jedoch nur bei dem blauen Licht wurde Melatonin unterdrückt (Plitnick et al. 2010). Sahin et al. vergleichen warmweißes Licht mit 2568 K bei 361 lx ($1,1 W/m^2$) und rotes Licht ($\lambda_{max}=631 nm$, 213 lx, $1,1 W/m^2$) am Tag und in der Nacht. Die Autoren zeigen auf, dass Licht mit hohem Rotanteil am Tag eine signifikante ($p<0,05$) reduzierte Reaktionszeit und ein höherer Durchsatz bei Leistungstests zur Folge hat (Sahin et al. 2014).

2.5.4 Nicht-visuelle Wirkung künstlicher Beleuchtung in Innenräumen

Die spektralen Reaktionen des menschlichen zirkadianen Systems hängen von der Bestrahlungsstärke und der Dauer der Lichtexposition ab (Gooley et al. 2010). Aoki et al. schätzen 1998 ausgehend von einer Regressionslinie nach einem Probandenversuch die minimale Beleuchtungsstärke zur Melatoninsuppression auf 285 lx am Auge nach einer zweistündigen Exposition mit einer kaltweißen Beleuchtung (Aoki et al. 1998).

Borisuit et al. untersuchen die visuelle Wahrnehmung und den Komfort der Beleuchtung sowie subjektive nicht-visuelle Variablen wie Stimmung, Aufmerksamkeit und Wohlbefinden unter künstlicher Bürobeleuchtung oder dem Tageslicht. Die vertikale Beleuchtungsstärke der Bürobeleuchtung war im Mittel 173,6 lx bei 3700 K. In der Tageslichtbedingung waren es im Mittel 1086 lx bei 4420 K. Die Probanden waren zwischen 12:00 und 18:00 Uhr den Beleuchtungssituationen ausgesetzt. Die Ergebnisse zeigen für den Abend eine signifikant höhere Wachheit der Tageslicht-Gruppe gegenüber der Kunstlicht-Gruppe auf; letztere war signifikant schläfriger (Borisuit et al. 2015).

Viola et al. zeigen in einer vierwöchigen Untersuchung mit 94 Probanden: Unter blauangereichertem weißem Licht mit 420 lx und 17000 K am Tag verbessern sich Konzentration ($p<0,0001$), subjektive Aufmerksamkeit ($p<0,0001$), Leistung ($p<0,0001$) und positive Stimmung ($p=0,0001$) von Büroarbeitern im Vergleich zu einer Beleuchtung mit nur 310 lx und 4000 K (Viola et al. 2008). Der Einfluss zweier unterschiedlicher Farbtemperaturen auf die

Schichtarbeit am Tag zwischen 08:00 und 20:00 Uhr untersuchen Mills et al. Die horizontale Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz war entweder 311 lx mit $17\,000\text{ K}$ oder 354 lx mit $2\,900\text{ K}$. Innerhalb der ersten sieben Wochen der 14-wöchigen Studie traten Verbesserungen bei Ermüdung (26,9%), Aufmerksamkeit (28,2%), Tagesschläfrigkeit (31%) und Arbeitsleistung (19,4%) in der Gruppe mit der $17\,000\text{ K}$ -Beleuchtung auf (Mills et al. 2007).

Hoffmann et al. belegen den Einfluss einer reduzierten blauen Beleuchtung auf die Büroarbeit in der Nacht. Bei einer Beleuchtungssituation mit einer Umfeldleuchtdichte von 300 cd/m^2 mit reduziertem Blauanteil ($1\,700\text{ K}$) ist in der Nacht die Melatoninausschüttung signifikant geringer als bei einer Farbtemperatur von $6\,300\text{ K}$. Die kognitive Leistungsfähigkeit der Probanden war nicht geringer (Hoffmann et al. 2008).

Souman et al. können ermitteln, dass bei identischer photopischer Beleuchtungsstärke am Auge mit zwei sich im Blaubereich unterscheidenden Spektren die Melatoninausschüttung signifikant variiert. Bei 175 lx am Auge in den Untersuchungsszenarien „Low MEF“, mit $55\alpha\text{-opic lx}$ und „High MEF“, mit $189\alpha\text{-opic lx}$ sind die Werte des gemessenen Melatonin signifikant unterschiedlich ($F_{1,13} = 22,67, p < 0,001, \eta_p^2 = 0,449$) (Souman et al. 2018).

Stefani et al. untersuchen die Eigenschaften des natürlichen Tageslichts und wie sich diese Eigenschaften auf die künstliche Raumbeleuchtung übertragen lassen. Sie weisen nach, dass wahrnehmbare Lichtveränderungen mit Farbtemperatur und Helligkeitswechsel gegenüber statischem Licht bevorzugt werden und dass dynamische Veränderungen der Beleuchtung für die Büroarbeit eingesetzt werden können und diese von den Nutzern akzeptiert werden (Braun et al. July 2009; Kroetz et al. 2016; Stefani et al. 2010a, 2012, 2016, 2017).

Das Pilotprojekt des Fraunhofer IAO „LightWork“ erforscht das Nutzerverhalten beim Einsatz einer farbveränderlichen LED-Bürobeleuchtung. Laut der Ergebnisse nach einer zweijährigen Nutzung hängt die gewählte Farbtemperatur der Nutzer von der Tages- und Jahreszeit ab. Im Sommer wurde kälteres Licht verwendet als im Winter. In den Morgenstunden wurde das Licht kälter gewählt als am Nachmittag oder Abend (Pross et al. 2015).

2.5.5 Bewertungsmethoden der nicht-visuellen Lichtwirkung

Zur Charakterisierung und quantitativen Messung der Wirkung von Licht auf den Menschen sind in der Literatur mehrere Gewichtungsfunktionen beschrieben. Die folgende Auflistung stellt die für diese Arbeit recherchierten Methoden in chronologischer Reihenfolge dar:

- Relative ration of circadian to photopic lumens (Rea et al. 2002)
- Circadian effective irradiance und circadian action factor (Gall und Bieske 2004). Übernommen in DIN V 5031-100:2009-06 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2009-06-01)
- Circadian stimulus: CS (Rea et al. 2005)
- Circadian potential und Circadian equivalent illuminance (Pechacek et al. 2008)
- Circadian light: CLA (Rea et al. 2010)
- Circadian efficiency (Bellia et al. 2011)
- Melanopic illuminance: M_ϕ (Enezi et al. 2011)
- Melatonin suppression value: $MS\%$ (Takahashi et al. 2011)
- Circadian illuminance (Bellia und Bisegna 2013)
- Melanopic suppression index: MSI (Aube et al. 2013)
- α -opic equivalent illuminance (Lucas et al. 2014)
- α -opic irradiance (CIE 2015)
- Melanopisch bewertete Strahlungsgröße und melanopischer Wirkungsfaktor nach DIN SPEC 5031-100:2015-08 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2015-08-01)
- Relative spectral effectiveness factor: RSE (Ámundadóttir et al. 2017)

Im Jahr 2001 beschreiben Brainard et al. und Thapan et al. jeweils ein Wirkungsspektrum für die Suppression von Melatonin in Menschen (Brainard et al. 2001; Thapan et al. 2001). Brainard et al. stellen eine maximale Melatoninsuppression bei 464 nm dar. Nach Thapan et al. liegt die maximale Melatoninsuppression zwischen 457 nm und 462 nm . Gall überführt diese Wirkungsspektren in die $c(\lambda)$ -Wirkungsfunktion (Gall 2002). Gall und Bieske führen den zirkadianen Wirkungsfaktor $a_{c,v}$ ein. Dabei wird das Verhältnis zwischen der zirkadian bewerteten Strahlungsgröße und der visuell bewerteten Strahlungsgröße berechnet (Gall und Bieske 2004). Die Wirkungsfunktion $c(\lambda)$ und der zirkadiane Wirkungsfaktor wurden in die deutsche Norm DIN V 5031-100:2009 übernommen, die dort als $s_{biol}(\lambda)$ Wirkungsfunktion definiert ist (Deutsches Institut für Normung e.V. 2009-06-01).

Enezi führt 2011 das Konzept der melanopischen Beleuchtungsstärke M_ϕ ein, demzufolge die maximale Sensitivität des Photopigment Melanopsin bei ca. 480 nm liegt (Enezi et al. 2011). Frühere Arbeiten unterstützen diese Erkenntnis (Berson et al. 2002), so dass die ursprüngliche

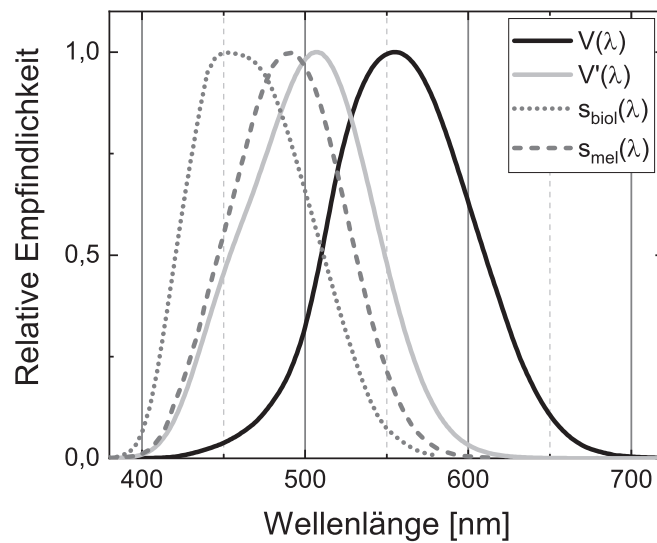


Abbildung 2.12: Wirkungsspektren nicht-visueller Bewertungsmethoden

maximale Melatoninunterdrückung in der Literatur auf 470–480 nm verschoben wird. Lucas erweitert 2014 die Methode der melanopischen Beleuchtungsstärke durch eine Skalierung, um sicherzustellen, dass die melanopische Beleuchtungsstärke der photopischen Beleuchtungsstärke einer theoretisch gleichen Energie entspricht (Lucas et al. 2014).

Zur Bewertung der zirkadianen Lichtwirkung spielen die ipRGCs eine doppelte Rolle: Erstens sind die ipRGCs eigenständige Photorezeptoren, die über Melanopsin aktiviert werden und für die Suppression von Melatonin sorgen. Es wurde bestätigt, dass der Mechanismus der Melatonin-suppression selbst in Abwesenheit von Stäbchen und Zapfen stattfindet. Zweitens empfangen und übertragen ipRGCs die Signale von Stäbchen und Zapfen, selbst in Abwesenheit von Melanopsin (Berson et al. 2002; Czeisler et al. 1995; Güler et al. 2007; Vandewalle et al. 2007, 2013).

Aus diesen Erkenntnissen leiten Lucas et al. ab: Anstelle der Einzelbetrachtung der ipRGCs sollten alle fünf Arten von Photorezeptoren betrachtet und deren jeweilige Lichtreize erfasst werden (Lucas et al. 2014). Zur Berechnung der jeweils gewichteten Beleuchtungsstärken jedes Photorezeptors bietet Lucas eine Excel-basierte Tollbox⁹ an. Auf dem „First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry“ der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) im Jahr 2013 wurde die Empfehlung formuliert, eine Betrachtung der Signale jedes Photorezeptors durchzuführen wie von Lucas aufgezeigt. Die von Lucas vorgeschlagene „ α -opic equivalent illuminance“ soll aufgrund des Konflikts der Leitlinien zur Verwendung von SI-Einheiten (Internationales Einheitensystem) als „ α -opic irradiance“ dem Äquivalent als Bestrahlungsstärke angegeben werden (CIE 2015).

⁹<http://lucasgroup.lab.manchester.ac.uk/research/measuringmelanopicilluminance/>

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnissen wurde vom DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL) die in der deutschen Vornorm definierte Gewichtungsfunktion $s_{biol}(\lambda)$ angepasst und als $s_{mel}(\lambda)$ in der Spezifikationsnorm DIN SPEC 5031-100:2015-08 neu veröffentlicht. Biologische Lichteffekte werden in dieser Norm unter dem Begriff **melanopische** Lichteffekte zusammengefasst. Die spektrale Empfindlichkeitskurve für die Melatoninunterdrückung wurde auf der Basis des Absorptionsspektrums des Photopigment Melanopsin neu definiert und als $s_{mel}(\lambda)$ bezeichnet (Abbildung 2.3(b)). Die spektrale Absorptionskurve des Melanopsin wird mit der spektralen Transmission der Augenlinse eines 32-jährigen Referenzbeobachters gefaltet. Daraus ergibt sich der Maximalwert der melanopischen Empfindlichkeitskurve von 490 nm (Deutsches Institut für Normung e.V. 2015-08-01).

Takahashi et al. entwickeln ein mathematisches Modell zur Berechnung der Melatoninsuppression abhängig von der Pupillenkontraktion: den „Melatonin suppression value“ $MS\%$. In diesem Modell werden die Wirkungsspektren von Brainard et al. und Thapan et al. mit dem Pupillendurchmesser und dem Pupillenreflex bewertet. Nach Aussage der Autoren konnte in dieser Arbeit keine Lösung gefunden werden, die sowohl die Melatoninunterdrückung von monochromatischen als auch von polychromatischem Licht beschreibt (Takahashi et al. 2011).

Aubé et al. zeigen mit dem „Melanopic Suppression Index“ (MSI) ein ähnliches Konzept wie der zirkadiane Wirkungsfaktor $a_{c,v}$ von Gall und Bieske (Gall und Bieske 2004). Der MSI beschreibt das Verhältnis zwischen der nicht-visuell bewerteten und der visuell bewerteten Bestrahlungsstärke. Die Autoren verwenden dabei eine unterschiedliche Normalisierung der spektralen Gewichtungsfunktion wie Gall und Bieske (Aube et al. 2013).

Ein weiteres Modell zur Bewertung der Wirkung des Lichts auf den Menschen ist das Modell der zirkadianen Lichtmenge und des zirkadianen Stimulus nach Rea et al. (Rea et al. 2010, 2002; Rea und Figueiro 2018; Rea et al. 2012). Diesem Modell zufolge beschreibt die nichtlineare Funktion einen Zusammenhang zwischen der Funktion der Melatoninsuppression, Effekten der zirkadianen Phasenverschiebung und der visuellen Wahrnehmung.

Im Jahr 2016 führt Ámundadóttir ein einheitliches Modell ein, um die melanopischen Wirkung zu quantifizieren und zu visualisieren. Für eine Beschreibung der nicht-visuellen Wirkung von Licht auf den Menschen führt die Autorin einen neuen einheitslosen Faktor ein: den RSE -Faktor (Relative Spectral Effectiveness) mit den tiefgestellten Indizes v und e , die für das photopische Sehen und die radiometrische Bewertung stehen.

In dem folgenden Abschnitt werden die für diese Arbeit relevanten Bewertungsmethoden detailliert erläutert:

Bewertung nach DIN SPEC 5031-10:2015-08

Die Spezifikationsnorm DIN SPEC 5031-10:2015-08 führt den Begriff der melanopischen Lichteffekte ein. In allgemeiner Form wird eine melanopisch bewertete Strahlungsgröße X_{mel} nach Formel 2.25 berechnet.

$$X_{mel} = \int_{360nm}^{780nm} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.25)$$

$X_{\lambda}(\lambda)$ ist dabei die spektrale strahlungs-physikalische Größe, die nicht wie bei der photometrischen Messung mit der $V(\lambda)$ -Kurve bewertet, sondern mit $s_{mel}(\lambda)$, dem Wirkungsspektrum der melanopischen Lichtwirkung multipliziert wird. Um das Integral nach 2.25 zu bilden, wird angenommen, dass $X_{\lambda}(\lambda)$ und $s_{mel}(\lambda)$ kontinuierliche mathematische Funktionen sind. In der Praxis wird das Integral durch eine Summe von diskreten Werten angenähert, z. B. mit einer Schrittweite für $\Delta\lambda$ von 5 nm (Deutsches Institut für Normung e.V. 2015-08-01):

$$X_{mel} = \sum_{n=1}^{n=m} X_{\lambda}(\lambda_n) \cdot s_{mel}(\lambda_n) \cdot \Delta\lambda \quad (2.26)$$

Die Beurteilung der Lichteinwirkung auf den Menschen erfolgt durch Messung der vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge und der Umrechnung in die melanopisch tageslicht-äquivalente Beleuchtungsstärke (MDEI) und den melanopischen Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$.

Der melanopische Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$ beschreibt das Verhältnis der melanopischen effektiven Strahlungsstärke zu dem mit der $V(\lambda)$ -bewerteten effektiven Strahlungsstärke, berechnet nach Gleichung 2.27.

$$a_{mel,v} = \frac{X_{e,mel}}{X_{e,v}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2.27)$$

Tabelle 2.3 listet den melanopischen Wirkungsfaktor und den Korrekturfaktor verschiedener Lichtarten nach DIN 5031-100 auf (Deutsches Institut für Normung e.V. 2015-08-01). Der Korrekturfaktor entspricht dem Quotienten des melanopischen Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$ einer Lichtquelle und dem melanopischen Wirkungsfaktor des Normlichts D65 $a_{mel,v,D65} = 0,906$. Zur Berechnung des MDEI wird zunächst das melanopische Tageslicht-Äquivalent $K_{mel,D65}$ berechnet. Dies ist das Verhältnis der photometrischen Größe für Tageslichtsicht zum melanopischen Wirkungsfaktor, dessen Strahlungsfunktion der Normlichtart D65 entspricht.

$$K_{mel,D65} = \frac{K_m}{a_{mel,v,D65}} = \frac{683\text{ lm/W}}{0.906} = 753.86\text{ lm/W} \quad (2.28)$$

Lichtart	$a_{mel,v}$	Korrekturfaktor
Normlichtart A (Glühlampe, $T_f=2\,856\,K$)	0,449	0,496
Lichtart B (Sonnenlicht)	0,761	0,840
Lichtart D50 (Tageslicht $T_f=5\,000\,K$)	0,768	0,848
Normlichtart D65 (nat. Tageslicht)	0,906	1,000
Lichtart D75 (Tageslicht $T_f=7\,500\,K$)	0,975	1,076
LED, weiß ($T_f=3\,075\,K$)	0,387	0,428
LED, weiß ($T_f=4\,250\,K$)	0,669	0,739
LED, weiß ($T_f=5\,400\,K$)	0,713	0,787
LED, weiß ($T_f=6\,535\,K$)	0,725	0,800

Tabelle 2.3: Melanopische Wirkungsfaktoren verschiedener Lichtarten

Mit $K_m = 683\,lm/W$, der maximale Wert des photometrischen Strahlungs-Äquivalents für Tageslicht und $a_{mel,v,D65} = 0,906$, der Wirkungsfaktor für D65. Schließlich wird der MDEI oder $E_{V,mel,D65}$ aus dem Produkt des melanopischen Wirkungsfaktors $a_{mel,v}$ der photometrischen Beleuchtungsstärke E_v und dem Quotienten des melanopischen Tageslicht-Äquivalents $K_{mel,D65}$ und dem maximalen Wert des photometrischen Strahlungs-Äquivalents berechnet:

$$E_{v,mel,D65} = \frac{K_{mel,D65}}{M_m} \cdot a_{mel,v} \cdot E_v = 1.10375 \cdot a_{mel,v} \cdot E_v \quad (2.29)$$

Der MDEI ist eine Maßeinheit, der den melanopischen Effekt einer Lichtquelle in Bezug des natürlichen Tageslicht (D65) darstellt. Durch die definierte Referenz auf das Tageslicht entspricht beispielsweise $100\,lx$ photopisch der gleichen Größe der melanopischen Bewertung ($100\,lx$ melanopisch).

Melanopic Suppression Index: MSI

Aubé beschreibt den Index zur Melatoninunterdrückung nach folgender Formel:

$$MSI = \frac{\int_{380nm}^{730nm} \Phi_{n(lamp)}(\lambda) M(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{730nm} \Phi_{n(D65)}(\lambda) M(\lambda) d\lambda} \quad (2.30)$$

$M(\lambda)$ ist dabei das relative Wirkungsspektrum der Melatoninsuppression nach Brainard et al. und Thapan et al. (Brainard et al. 2001; Thapan et al. 2001). $\Phi_{n(lamp)}$ das Spektrum der zu untersuchenden Lichtquelle und $\Phi_{n(D65)}$ das Spektrum des Tageslichts.

„Circadian Light“ und „Circadian Stimulus“: CL_A und CS

Rea beschreibt die Funktion der spektralen Empfindlichkeit von nächtlicher Melatoninunterdrückung als „circadian Light“ CL_A nach folgender Formel (Rea und Figueiro 2018):

$$CL_A = \begin{cases} 1548 \left[\int M_{C\lambda} E_\lambda d\lambda + \left(a_{b-y} \left(\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \right) - a_{rod} \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda E_\lambda d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \right] \\ \text{wenn } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda > 0 \\ 1548 \int M_{C\lambda} E_\lambda d\lambda \quad \text{wenn } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \leq 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

Details zur Berechnung des CL_A und die Beschreibung der Faktoren befinden sich in Anhang A.2.2. Gleichung 2.32 liefert die funktionelle Beziehung zwischen dem zirkadianen Stimulus CS und des CL_A . Diese Beziehung ist proportional zu Melatoninsuppression in der Nacht in Prozent.

$$CS = 0,7 - \frac{0,7}{1 + \left(\frac{CL_A}{355,7}\right)^{1,1026}} \quad (2.32)$$

Da für die Berechnung von CL_A zwei spektrale Wirkungsfunktionen zu Grunde liegen und in der Formel zwei Bedingungen definiert sind, entsteht bei der Abbildung eines Schwarzkörpers über den sichtbaren Spektralbereich mit dieser Formel eine Sprungfunktion bei 3 500 K. Anhang A.2.2 verdeutlicht diesen Effekt und dessen Konsequenz.

Es ist fraglich, da die Linearität der Wahrnehmung von Wandell gezeigt wurde (Wandell 1995), ob die angegebene Funktion verwendet werden kann. Bereits 1751 formulierte Carl von Linné die Annahme „Natura non facit saltus“ (lateinisch für „Die Natur macht keine Sprünge“) (Linné und Freer 2007). Die moderne Wissenschaft kennt nur wenige Ausnahmen zu diesem Prinzip, z. B. die Mutation von Genen in der Biologie oder den Quantensprung in der Physik.

Relative Spectral Effectiveness Factor: RSE -Faktor

Der sehkraftbezogene $RSE_{v,i}$ -Faktor (Ámundadóttir et al. 2017) beschreibt die Beziehung zwischen der gewichteten Bestrahlungsstärke mit der spektralen Gewichtungsfunktion der einzelnen Rezeptoren $S_i(\lambda)$ und der spektralen Bestrahlungsstärke gewichteten $V_{10}(\lambda)$ Funktion nach folgender Funktion:

$$RSE_{v,i} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda) V_{10}(\lambda) d\lambda} \times A_v \quad (2.33)$$

Dabei ist A_v eine Normalisierungskonstante, die der Fläche von $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_{10}(\lambda)d\lambda$ entspricht. Der Index i steht für die fünf Photorezeptoren ipRGC, L-Zapfen, M-Zapfen, S-Zapfen oder Stäbchen mit den jeweiligen Gewichtungsfunktionen $S_i(\lambda)$. Die nicht-visuelle Wirkung des Lichts kann direkt aus der radiometrischen Größe berechnet werden. Hierfür wird der energiebezogene $RSE_{e,i}$ Faktor eingeführt. Dieser beschreibt die Beziehung zwischen dem gewichteten Spektrum der Bestrahlungsstärke $S_i(\lambda)$ und dem nicht gewichteten Spektrum der Bestrahlungsstärke nach folgender Gleichung:

$$RSE_{e,i} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda)S_i(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda} \times A_e \quad (2.34)$$

Der RSE -Faktor beschreibt die okulare Bestrahlung der fünf Photorezeptoren. Ist der RSE -Faktor kleiner eins (< 1), hat die Lichtquelle ein geringes Reizpotential für das nicht-visuelle System des Menschen. Ist der RSE -Faktor größer eins (> 1), ist das Reizpotential groß.

Begrifflichkeiten der nicht-visuellen Bewertungsmethoden

In der Zusammenfassung der nicht-visuellen Bewertungsmethoden lässt sich folgende Begrifflichkeit festlegen: Die internationale Beleuchtungskommission CIE weist darauf hin, dass der Begriff „melanopische Lux“, der ursprünglich von Enezi (Enezi et al. 2011) eingeführt wurde, von dem im CIE-Workshop vorgeschlagenen Begriff „melanopisch äquivalente Lux“ zu unterscheiden ist (CIE 2015). Durch die unterschiedliche Normalisierung der zu Grunde liegenden Funktionen gibt es einen Umrechnungsfaktor zwischen diesen beiden Methoden.

Aktuell wird an einem internationalen Standard gearbeitet, der die Bewertung nicht-visueller Effekte auf den Menschen zusammenfasst. Dieser Standard liegt zum jetzigen Zeitpunkt als „vorbereitend“ (Preparatory) vor mit der Nummer ISO/NP TR 21783 (ISO 2018).

2.5.6 Nicht-visuelle Wirkung von Displaylicht

Brainard et al. untersuchen im Jahr 2000 den Einfluss von polarisiertem Licht auf die Melatoninunterdrückung. Die Autoren fanden bei keiner untersuchten Beleuchtungsstärke einen signifikanten Unterschied zwischen polarisiertem Licht und unpolarisiertem Licht (Brainard et al. 2000). Dies lässt die Annahme zu, dass bei der Betrachtung von Flüssigkristalldisplays, die prinzipbedingt polarisiertes Licht ausstrahlen, es keinen Effekt durch die Polarisation auf den zirkadianen Rhythmus gibt.

Higuchi et al. zeigen 2003 in einer Studie die Wirkung des Lichts auf den Menschen mit einem Kathodenstrahlröhrenbildschirm (CRT). Sieben männliche Erwachsene wurden zwei verschiedenen Beleuchtungsstärken ausgesetzt, einer hellen von 45 lx und einer dunklen von 15 lx am Auge, zwischen 23:00 Uhr und 02:00 Uhr. Die Probanden mussten eine langweilige und eine aufregende Aufgabe unter beiden Beleuchtungsstärken bearbeiten. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten bei der aufregenden Aufgabe in beiden Beleuchtungssituationen eine signifikante Verringerung der Herzfrequenz und der Körperkerntemperatur sowie eine nächtliche Erhöhung der Schläfrigkeit. Bei der hellen Beleuchtungsstärke konnte eine signifikante Reduzierung der Körperkerntemperatur in beiden Aufgaben festgestellt werden. Die Melatoninkonzentration im Speichel wurde bei der hellen Beleuchtungsstärke in Kombination mit der aufregenden Aufgabe signifikant unterdrückt (Higuchi et al. 2003).

Porsch et al. entwickeln 2004 ein experimentelles Messverfahren für Monitore und TV-Bildschirme zur Bestimmung der zirkadianen Wirksamkeit. Die Autoren orientieren sich an der $c(\lambda)$ -Wirkungsfunktion von Gall und des zirkadianen Wirkungsfaktor $a_{c,v}$ (Gall 2002; Gall und Bieske 2004). Bei Messungen von CRT-Bildschirmen mit ca. 95 cd/m^2 und einem $a_{c,v}=0,78$ wurde in 50 cm Abstand zum Bildschirm eine Beleuchtungsstärke von 32 lx gemessen. Bei typischen Bildinhalten verringerte sich die Leuchtdichte auf $20\text{--}40\text{ cd/m}^2$, was einer Beleuchtungsstärke von $7\text{--}13\text{ lx}$ entsprach. Die Autoren leiteten aus den Werten ab, dass bei typischen Bildschirmarbeitsplätzen der Einfluss des Monitorlichts auf die Melatoninunterdrückung gering ist (Porsch et al. 2004).

In einer gemeinsamen Studie des Fraunhofer IAO und der UPK Basel können unterschiedliche physiologische Reaktionen bei zwei spektral unterschiedlichen Displays nachgewiesen werden (Cajochen et al. 2011; Stefani et al. 2010a). Der Testablauf der Studie bestand aus verschiedenen Aufmerksamkeits- und Reaktionstests zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Versuchspersonen. Parallel zu den Tests wurden verschiedene physiologische Parameter erfasst: Die Messung des Melatonins im Speichel, die Wachheit und Aktivität mit der Elektroenzephalografie (EEG) sowie die Erfassung der Müdigkeit mithilfe der langsamen Augenbewegungen (Slow Eye Movement (SEM)), gemessen mit der Elektrookulografie (EOG). An der Studie nahmen 13 junge männliche Probanden (mittleres Alter: $23,8\text{ Jahre} \pm 5,0$) teil. Die Ausschlusskriterien waren Rauchen, Medikamenteneinnahme oder Drogenkonsum, Schichtarbeit innerhalb der letzten drei Monate und transmeridiane Flüge bis drei Monate vor der Studie. Einschlusskriterien waren ein guter Gesundheitszustand und eine gute Schlafqualität (Pittsburgh-Schlafqualitätsindex (PSQI) (Buysse et al. 1989): <5) und ein Schlaf-Wach-Verhalten ohne extremen Chronotyp (Münchener Chronotyp Fragebogen (MCTQ) (Roenneberg et al. 2003b): >3 bis <6). Das Studienprotokoll umfasste zwei Wochen. Ein regelmäßiger Schlaf-Wach-Zeitplan (Bettzeiten und Aufwachzeiten innerhalb von 30 Minuten nach selbstgewählter Zielzeit) war von den Probanden einzuhalten. In einem vollständig lichtgeschützten Raum mit zwei Kabinen, die gegenseitig

nicht einsehbar waren, saßen die Probanden in 60 cm Abstand vor den Displays. Zwei verschiedene Computerbildschirme wurden verglichen: ein RGB-LED-hinterleuchteter LCD (HP LP2480zx) und ein mit CCFL (Kaltkathodenleuchtstofflampe) hinterleuchteter Bildschirm (HP LP2475w). Beide Displays hatten eine Bildschirmdiagonale von 24 Zoll und eine Auflösung von 1920 x 1200 Pixel. Die Leuchtdichte war bei beiden Displays auf 250 cd/m^2 eingestellt und die Beleuchtungsstärke am Auge war 110 lx . Die Farbtemperatur des LED-Displays betrug 6953 K , die des CCFL-Displays 4775 K . Der gemessene Farbwert des Weißpunktes des LED-Displays war $u' = 0,1971$ $v' = 0,4623$. Der Weißpunkt des CCFL-Display war $u' = 0,1966$ $v' = 0,5171$. Die Bestrahlungsstärke im Blaubereich zwischen 400 nm und 480 nm betrug beim LED-Display $0,241 \text{ W/m}^2 \text{ sr}$ und $0,099 \text{ W/m}^2 \text{ sr}$ beim CCFL Display. Obwohl der Unterschied in der Farbtemperatur sichtbar ist, konnten die Testpersonen nach einer Woche Pause zwischen den beiden Versuchen sich nicht mehr an den Unterschied erinnern (Cajochen et al. 2011; Stefani et al. 2010b).

Figueiro et al. können in einer Nutzerstudie mit 21 Probanden im Jahr 2011 nachweisen, dass durch die Verwendung einer orange eingefärbten Brille, die Wellenlängen unterhalb von 525 nm filtert, eine geringere, nicht signifikante Melatoninsuppression auftritt. Bei der Anwendung einer Brille mit integrierten blauen (470 nm) LEDs, die zusätzlich 40 lx am Auge erzeugen, wird eine signifikante Reduktion des Melatonins verzeichnet (Figueiro et al. 2011). Im Jahr 2013 veröffentlichen Wood et al. eine Studie mit den Testbedingungen von Figueiro et al. von 2011, also mit einer orange eingefärbten Brille sowie einer mit blauen LEDs versetzten Brille. Im Unterschied zu Figueiro verwendet Wood jedoch anstelle des CRT-Monitors ein Tablet-Display (Apple iPad 2) als Anzeigesystem, das eine Beleuchtungsstärke von $16 \text{ lx} \pm 2,7$ am Auge erreicht. Das Tablet mit der blauen LED-Brille hatte eine Beleuchtungsstärke am Auge von $57 \text{ lx} \pm 3,8$. Das Tablet mit der orange eingefärbten Brille hatte eine Beleuchtungsstärke von $9,9 \text{ lx} \pm 1,6$ am Auge. Nach einer zweistündigen Nutzung des Tablet-Displays wurde eine signifikante Melatoninsuppression festgestellt. In Kombination mit der LED-beleuchteten Brille wurden diese Ergebnisse bereits nach einer Stunde erreicht. Bei der Betrachtung durch eine orange Brille kam es zu einer deutlich geringeren Reduktion des Melatonins (Wood et al. 2013).

Im darauffolgenden Jahr können Chang et al. zeigen, dass durch Lesen eines Textes an fünf aufeinanderfolgenden Abenden vier Stunden vor dem Zubettgehen auf einem Tablet-Display im Vergleich zu einem gedruckten Buch, die Probanden länger benötigten, um einzuschlafen. Die Tablet-Leser wiesen eine geringere abendliche Schläfrigkeit und eine signifikante Melatoninsuppression ($55,12 \pm 20,12 \%$, $p < 0,001$) im Vergleich zu den Lesern des Buches ($-18,77 \pm 39,57 \%$) auf (Chang et al. 2014). Grønli et al. untersuchen das Lesen eines elektronischen Buches (iPad 4. Generation) mit einer signifikant höheren Beleuchtungsstärke von $58,3 \pm 6,9 \text{ lx}$ ($p < 0,001$) im Vergleich zu einem gedruckten Buch mit einer Beleuchtungsstärke am Auge von $26,7 \pm 8,0 \text{ lx}$. Die Ergebnisse nach jeweils 30 Minuten Lesen an zwei aufeinanderfolgenden Abenden zeigten

eine subjektiv höhere Schläfrigkeit beim Lesen eines Buchs als beim Lesen eines Tablets (KSS: $7,6 \pm 0,3$ gegenüber $6,9 \pm 0,3$; $p = 0,035$) und eine verzögerte und langsame Gehirnaktivität während des Schlafes, wie EEG-Messungen zeigen (Grønli et al. 2016).

Rångtell et al. vergleichen bei 14 Teilnehmern zweistündiges (21:00–23:00 Uhr) Lesen eines Displays und eines Buches bei vorheriger Belichtung von 6,5 Stunden mit hellem Licht von $569 lx$. Die Farbtemperaturen des Buches waren $2\,674 K$ bei einer Beleuchtungsstärke von $67,3 lx \pm 49,9$ und des Tablet-Displays $7\,781 K$ bei $102,1 lx \pm 41,4$. Die Untersuchung erbringt keinen Unterschied zwischen den Schlafparametern und dem Speichel-Melatonin-Spiegel vor dem Schlafengehen (Rångtell et al. 2016).

Figueiro et al. untersuchen die Wirkung eines großen TV-Displays (70 Zoll) auf die Melatoninunterdrückung. 16 Probanden schauten in $1,8 m$ und $2,7 m$ Abstand mehrere Filme bei drei unterschiedlichen Displayeinstellungen ($12\,000 K$, $6\,500 K$, $2\,700 K$). Bei $12\,000 K$ und $1,8 m$ Abstand war die Beleuchtungsstärke am Auge $16,98 lx$ (maximaler Wert). Bei $2\,700 K$ und $2,7 m$ Abstand waren es $2,71 lx$. Es gab keinen signifikanten Effekt auf die Melatoninsuppression bei allen Szenarien (Figueiro et al. 2013).

In einem Experiment von Sroykham und Wongsawat im Jahr 2013 werden fünf Probanden in einem Meter Abstand vor einem LED beleuchteten Display (20 Zoll Diagonale, $250 cd/m^2$ Leuchtdichte) mit blauem ($470 nm$) und rotem ($650 nm$) Licht bestrahlt. Vor der Bestrahlung und 30 Minuten danach wurden Melatonin im Speichel der Probanden gemessen. Die Ergebnisse zeigen eine Melatoninsuppression von 91 % bei blauem Licht, 78 % bei rotem Licht und 44 % bei keinem Licht (Sroykham und Wongsawat 2013).

Gradisar et al. weisen 2013 mit einer Umfrage mit 1 508 männlichen Amerikanern zwischen 13 und 64 Jahren den Zusammenhang zwischen Nutzung von Technologien und Schlafstörungen nach. 72 % der Jugendlichen (13-18 Jahre), 67 % der jungen Erwachsenen (19-29 Jahre), 36 % der mittleren Erwachsenen (30-45 Jahre) und 16 % der älteren Erwachsene (46-64 Jahre) nutzen ein Mobiltelefon eine Stunde vor dem Zubettgehen (Gradisar et al. 2013). Fossum et al. führen eine Umfrage unter 532 Studenten im Alter von 18 bis 39 Jahren bei einer nächtlichen Verwendung eines Fernsehers, eines Computers, einer Spielekonsole, eines Tablets, eines Mobiltelefons oder eines Audioplayers im Bett vor dem Einschlafen mit durchschnittlich 46,6 Minuten durch. Die Autoren beschreiben einen Zusammenhang zwischen der Nutzung elektronischer Anzeigeräte und Schlaflosigkeit, Tagesschläfrigkeit, einer Morgenpräferenz und des Chronotyps (Fossum et al. 2014).

Bei Jugendlichen ist die abendliche Reduktion des Melatoninspiegels durch Licht mit erhöhtem Blauanteil besonders stark, da sich die innere Uhr bis zum Ende der Adoleszenz überdurch-

schnittlich nach später verschiebt (Foster und Roenneberg 2008; Roenneberg 2004). Heath et al. untersuchen die abendliche Wirkung eines Tablet-Displays (iPad 2) hinsichtlich der Aktivierung und morgendlichen Funktionsfähigkeit von 16 gesunden Jugendlichen. Eine Stunde vor dem Zubettgehen wurde entweder ein Tablet-Display mit $80 lx$ und $6500 K$, ein gedimmtes Display mit $1 lx$ oder ein Blaulicht-gefiltertes Display (f.lux) mit $50 lx$ und $2700 K$ genutzt. Es gab keinen signifikanten Effekt zwischen unterschiedlichen Chronotypen. Jedoch, je nach dem ob ein helles oder dunkles Display genutzt wurde, traten zwischen dem hellen und dunklen Display bei der abendlichen Aktivierung signifikante Effekte auf (Heath et al. 2014).

Im Jahr 2015 zeigen van der Lely et al. in einer zweiwöchigen Studie mit 13 männlichen Probanden zwischen 15 und 17 Jahren, dass durch das abendliche Tragen einer orange eingefärbten Brille bei Nutzung von LED-beleuchteten Displays eine signifikante Verringerung der Melatoninsuppression, der subjektiven Schläfrigkeit sowie der Wachsamkeit auftritt. Die Probanden ohne die Brille waren deutlich in ihrer zirkadianen Phase gegenüber der Gruppe mit den Brillen verschoben (van der Lely et al. 2015). Figuera und Overington zeigen 2015, dass bei Jugendlichen zwischen 15 und 17 Jahren eine deutlich höhere Melatoninsuppression als bei Erwachsenen stattfindet und junge Menschen signifikant sensitiver auf abendliches Licht reagieren (Figueiro und Overington 2016). Brockmann et al. beschreiben den Zusammenhang von Fernsehgewohnheiten bei Kleinkindern ($2,7 \pm 1,5$ Jahre) und Schlafstörungen. Bei einer Umfrage der Eltern von 100 Kindern stand bei 51 % der Teilnehmer ein Fernseher im Schlafzimmer. Das Vorhandensein eines Fernsehers im Schlafzimmer des Kindes führte zu einer deutlichen geringeren Qualität des Schlafes (Brockmann et al. 2016).

Exelmans et al. beschreiben den Zusammenhang von abendlicher Nutzung von Mobiltelefonen und Schlafprobleme durch eine Umfrage bei 844 Erwachsenen (18–94 Jahre). Die Hälfte der Befragten besaß ein Smartphone und sechs von zehn nahmen dieses mit ins Schlafzimmer. Ein Anstieg der Schlaflosigkeit und eine erhöhte Müdigkeit ist die Folge des Gebrauchs eines Mobiltelefons vor dem Zubettgehen (Exelmans und van den Bulck 2016). Christensen et al. untersuchen die Smartphone-Nutzung durch Messung der Bildschirmzeit von 653 jungen Erwachsenen. Die gesamte Bildschirmzeit über 30 Tage war ein Median von 38,4 Stunden. Eine längere durchschnittliche Bildschirmzeit war verbunden mit kürzerer Schlafdauer und schlechterer Schlafeffizienz (Christensen et al. 2016).

Oh et al. berechnen die zirkadiane Wirkung von Smartphone-Displays in einer hellen und einer dunklen Umgebung. Die Autoren verwenden die von Gall beschriebene $c(\lambda)$ -Wirkungsfunktion und gelangen zur Schlussfolgerung: In einem hellen Raum ist der resultierende Wert der Melatoninunterdrückung größer als in einem dunklen Raum (Oh et al. 2015). Zur Arbeit von Oh et al. ist kritisch anzumerken, dass das Ergebnis und die Schlussfolgerung der Autoren bereits aktuellen Erkenntnissen entsprechen und keinen Mehrwert erzeugen.

Green et al. untersuchen die Wirkung eines 22 Zoll LED-Displays auf die Melatoninunterdrückung mit vier verschiedenen Lichteinstellungen. 19 Probanden zwischen 20 und 29 Jahren betrachteten für zwei Stunden (21:00–23:00 Uhr) das Display bei den Beleuchtungsstärken von $80 lx$ ($35 mW/cm^2$) und $350 lx$ ($160 mW/cm^2$) und den dominanten Wellenlängen von $460 nm$ und $620 nm$. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluss der $460 nm$ Bedingung gegenüber der $620 nm$ Bedingung auf die Melatoninunterdrückung über der Zeit ($F_{1,17} = 5,01, p < 0,05$). Ebenfalls wurde ein Effekt der kurzen Wellenlänge gegenüber der Zeit auf die Köpertemperatur festgestellt ($F_{5,90} = 6,17, p < 0,001$). Der Effekt der Wellenlängenveränderung war größer als die Veränderung der Beleuchtungsstärke (Green et al. 2017).

Jones et al. untersuchen die Wirkung der abendlichen Nutzung eines Tablet-Displays (Apple iPad mini) auf die Schlafqualität und morgendliche Leistung von Sportlern. Acht Leistungssportler waren zwei Beleuchtungssituationen durch Displays ausgesetzt; etwa $200 lx$ am Auge und etwas $100 lx$ am Auge. Es zeigt sich trotz geringerer Melatoninkonzentration durch die Verwendung des Tablet-Displays kein signifikanter Effekt auf die Schlafqualität und Leistungsfähigkeit (Jones et al. 2018). Kritisch anzumerken zu dieser Studie mit kontrollierten Bedingungen ist die fehlende Angabe der Lichthistorie über den Tag.

Heo et al. untersuchen in einer randomisierten, doppelblinden Cross-Over-, Placebo kontrollierten Studie die Wirkung von Smartphone-Licht auf den Melatonin- und Kortisol-Spiegel, die Körpertemperatur und die Schlafqualität. An drei Tagen zwischen 19:30 Uhr und 22:00 Uhr wurde entweder ein Smartphone mit hohem Blauanteil verwendet oder ein Smartphone in Kombination mit einer orangenen Brille (Filterung: $\lambda < 539 nm$). Im Ergebnis konnte bei der Nutzung der Blaulicht-Smartphones eine signifikant verminderte Schläfrigkeit festgestellt werden. Veränderungen im Melatonin- und Kortisol-Spiegel waren nicht signifikant nachweisbar (Heo et al. 2017). Jedoch geben die Autoren weder Messwerte der Beleuchtungsstärke oder der spektralen Bestrahlungsstärke noch die lichttechnischen Eigenschaften des Displays oder die am Auge auftreffende Strahlung an. Ein Vergleich mit anderen Studien ist folglich nicht möglich.

Nagare et al. untersuchen die Wirkungsweise des Apple „Night Shift Modus“. Die Autoren verglichen den „Night Shift Modus“ in der maximalen Einstellung „Wärmer“ („Night Shift Low CCT“) ($2837 K$) mit einer Beleuchtungsstärke von $54,3 lx$ zu „Night Shift Modus“ maximal „Kälter“ („Night Shift High CCT“) ($5997 K$) mit $97,8 lx$ am Auge in $30 cm$ Abstand nach jeweils einer und zwei Stunden (t_{23}). Ferner untersuchten sie das Tragen einer Brille mit blauen LEDs ($470 nm$) mit einer angegebenen Beleuchtungsstärke von $40 lx$ am Auge und das Tragen einer orangenen Brille als Kontrollgruppe. Die Ergebnisse zeigen einen signifikant größeren Effekt der Blaulichtbrille (Melatoninsuppression $41 \pm 4,1 \%$) zu „Night Shift High CCT“ ($17 \pm 4,6 \%$) ($t_{23} = 8,09, p < 0,05$) und zu „Night Shift Low CCT“ ($10 \pm 2,7 \%$) ($t_{23} = 5,77, p < 0,05$). Zwischen den beiden Einstellungen des „Night Shift Modus“ konnte keine Signifi-

kanz gefunden werden. Die Autoren schlussfolgern, dass die Anpassung der spektralen Zusammensetzung einer selbstleuchtenden Anzeige ohne Anpassung ihrer Helligkeitseinstellung nicht ausreichend sein kann, um hinreichende Auswirkungen auf das zirkadiane System auszuüben (Nagare et al. 2018).

Allen et al. liefern 2018 den physiologischen Beweis, dass die Darstellung metamerer Bildinhalte auf einem projektionsbasierten Display eine unterschiedliche Melatoninunterdrückung zur Folge haben kann. Elf junge männliche Erwachsenen betrachteten ein projiziertes Displaybild mit zwei unterschiedlichen spektralen Zusammensetzungen basierend auf den Primärfarben Violett, Cyan, Grün, Gelb und Rot zwischen 18:00 und 23:00 Uhr. Jedes Mal war die Leuchtdichte 79 cd/m^2 mit einer resultierenden Beleuchtungsstärke am Auge von $73,5 \text{ lx}$. Der Farbort beider Spektren für ein weißes Bild war $x = 0,40$ und $y = 0,36$ (Abbildung 2.11). Die Spektren unterschieden sich in der melanopischen Beleuchtungsstärke (24,7 zu 77,7 melanopische Lux) und in der Stäbchen-Bestrahlungsstärke (71,8 zu 34,8 rhodopic lux). Der Unterschied der restlichen Photorezeptoren war $<5\%$. Die Ergebnisse der Melatoninuntersuchung zeigen eine signifikante Melatoninunterdrückung zwischen den Bedingungen ($F_{1,11} = 6,3$ $P = 0,03$) und zwischen der Bedingung x Zeit ($F_{11,99} = 2,0$ $P = 0,035$). Zwischen den beiden untersuchten Bedingungen lag eine Woche. Die Autoren beschreiben, dass die Probanden keinen signifikanten visuellen Unterschied zwischen den beiden Lichtspektren erkennen konnten (Allen et al. 2018).

Zusammenfassung nicht-visueller Wirkungen von Displaylicht

Die vorgestellten Studien zur nicht-visuellen Lichtwirkung von Displays zeigen einen Zusammenhang zwischen der Displaygröße und der Beleuchtungsstärke bei dem Signifikanzniveau der Melatoninunterdrückung. In den Untersuchungen mit Tablet-Displays ergeben die Ergebnisse von Wood et al., Grønli et al. und Nagare et al. einen signifikanten Unterschied der Melatoninkonzentration bei zusätzlicher Verwendung einer Brille mit blauen LEDs. Wood et al. zeigen eine signifikante Melatoninunterdrückung von 66% beim Lesen eines iPad mit zusätzlichen blauen LEDs mit einer Beleuchtungsstärke von 57 lx am Auge (Wood et al. 2013). Grønli et al. ermitteln signifikante Ergebnisse beim Lesen eines iPad mit zusätzlichen blauen LEDs von etwa 58 lx zu 27 lx (Grønli et al. 2016). Die blauen LEDs (470 nm) in der Studie von Wood et al. werden bei einer Beleuchtungsstärke von $L_v = 40 \text{ lx}$ mit einer Bestrahlungsstärke $L_e = 40 \mu\text{W/cm}^2$ angegeben. Hierbei muss wiederholt auf die Problematik der in der Literatur verwendeten Angabe der Beleuchtungsstärke bei blauen LEDs hingewiesen werden (vgl. A.2.1). Eine blaue LED mit $40 \mu\text{W/cm}^2$ hat einen melanopischen Wirkungsfaktor $a_{mel,v} = 9,4$ und ein MDEI von etwa 250 lx . Dies bedeutet, die nicht-visuelle Lichtwirkung entspricht etwa einer weißen LED mit 6500 K ($a_{mel,v} = 0,725$) bei einer Beleuchtungsstärke von 320 lx .

Rångtell et al. ermitteln keinen signifikanten Unterschied zwischen dem Lesen eines Tablet-Displays mit etwa 100 lx am Auge und dem Lesen eines beleuchteten Buches mit etwa 67 lx am Auge, wenn die Probanden tagsüber hohen Beleuchtungsstärken ausgesetzt waren (Einfluss Lichthistorie) (Rångtell et al. 2016). Heath et al. stufen die klinische Bedeutung der Unterschiede in der Melatoninkonzentration der mit Tablet-Displays durchgeführten Studien als gering ein (Heath et al. 2014).

Die Studien mit Computermonitoren zeigen signifikante Ergebnisse bei ähnlichen Beleuchtungsstärken von etwa 100 lx am Auge. Sowohl bei dem 24“ LED-Display in 60 cm Abstand bei Cajochen et al. als auch bei dem 20“ Display in 1 m Abstand bei Sroykham und Wongsawat ist die Melatoninunterdrückung signifikant (Cajochen et al. 2011; Sroykham und Wongsawat 2013).

2.6 Schädigung durch blaues Licht

Optische Strahlung besitzt abhängig von der Wellenlänge, Energie und Expositionszeit zellschädigende Eigenschaften. Besonders hochenergetische blaue Lichtstrahlung spielt eine Rolle bei Augenerkrankungen, beispielsweise der altersbedingten Makuladegeneration¹⁰ (AMD) (Flammer et al. 2013). AMD ist die häufigste Ursache irreversibler Erblindung bei Menschen in entwickelten Ländern, die 50 Jahre oder älter sind (Jager et al. 2008).

Behar-Cohen et al. analysieren in ihrer Arbeit die potentiellen Risiken weißer LED-Lichtquellen (Behar-Cohen et al. 2011). Die Autoren kombinieren präklinische Kenntnisse sowie epidemiologische Studien über licht-induzierte retinale Schädigungen. Zwei grundlegende Mechanismen licht-induzierter Schädigungen der Retina werden beschrieben: photothermale Schäden und photochemische Schäden:

„Heat: radiant energy is converted into movement of molecules (kinetic energy) such as vibration, rotation and translation. Thus, the temperature is increased. [...] Photothermal damage occurs when the rate of light energy released by thermal deactivation is faster than thermal diffusion, inducing a raise of the tissue temperature.“ (Behar-Cohen et al. 2011, S. 4)

„Photochemical damage occurs when light is absorbed by a chromophore and leads to the formation of an electronically excited state of that molecule, which then undergoes either chemical transformation itself and/or interacts with other

¹⁰Makuladegeneration oder Photo-Makulopathie beschreibt eine Gruppe von Erkrankungen, bei der zentrale Bereiche der Netzhaut, z. B. durch Abbau des Gewebes die Funktionsfähigkeit verliert.

molecules leading to chemical changes of both interacting molecules or to a transfer of the excitation energy to the other molecules, which may then become chemically reactive. Radicals and reactive oxygen species (ROS) may thus be formed leading to photodynamic effect.“ (Behar-Cohen et al. 2011, S. 4)

Behar-Cohen erläutert in seiner Arbeit den Aufbau des Auges und welche Bereiche des Auges für UV-Licht, sichtbares Licht (VIS) und IR-Licht transmissiv sind. Der Autor zitiert die Arbeit von Sliney (Sliney 2002, 2005), der die Transmission der Wellenlängen des sichtbaren Lichts untersuchte, die durch das Auge auf die Retina treffen. Tabelle 2.4 zeigt die altersabhängige Transmissionsrate des Auges. Der prozentuale Wert gibt an, wie groß der Anteil der Strahlung ist, der auf die Retina trifft, abhängig von der Wellenlänge, nach dem Durchdringen des Auges. Folglich sind potentielle phototoxische Netzhautschädigung mit Wellenlängen im Blaulichtspektrum zwischen 400 nm und 460 nm zu erwarten.

Alter	UV-A			VIS		IR
	320 nm	400 nm	460 nm	>500 nm	>630 nm	760 nm
<9 Jahre	2-5 %	15 %	65 %	65 %	70 %	-
10 Jahre	-	15 %	60 %	65 %	70 %	-
60 – 70 Jahre	-	1 %	40 %	65 %	70 %	-

Tabelle 2.4: Altersabhängige Transmissionsrate des Auges nach (Behar-Cohen et al. 2011)

Behar-Cohen untersucht LED-Leuchten mit einzelnen Lichtquellen mit $0,5\text{ W}$ elektrischer Leistung und Leuchtdichten zwischen $1,1 \cdot 10^7\text{ cd/m}^2$ und $2,2 \cdot 10^7\text{ cd/m}^2$. Darüber hinaus 10×10 Arrays dieser LEDs mit einer durchschnittlichen Leuchtdichte von $2,8 \cdot 10^7\text{ cd/m}^2$. Tabelle 2.5 gibt einen Überblick verschiedener Lichtquellen und deren Leuchtdichten. Behar-Cohen weist nach, dass LEDs nach dem neuesten Stand der Technik, die weißes Licht emittieren, keine thermischen Gefahren darstellen (Behar-Cohen et al. 2011). Die Eingruppierung der weißen LEDs in die Risikogruppen der Norm DIN EN 62471:2009-03 (Tabelle A.2) hängt von der Abstrahlcharakteristik, der abgegebenen Strahldichte und der Expositionszeit ab. LEDs mit einem Lichtstrom kleiner 100 lm , das in diesem Experiment einer Leuchtdichte von $1,61 \cdot 10^7\text{ cd/m}^2$ entspricht, sind unterhalb der Expositionsgrenze der Risikogruppe 0 (kein Risiko).

Die Brechungsindizes der transparenten Medien im Auge führen zu einer Dispersion der Wellenlängen abhängigen Brechung. Folglich ist die Fokusebene von blauem Licht ca. 1 mm vor der Fokusebene von rotem Licht (Flammer et al. 2013).

Lichtquelle	Leuchtdichte
Sonne am Mittag	1 600 000 000 cd/m^2
Weißer LED	50 000 000 cd/m^2
Sonne am Horizont	6 000 000 cd/m^2
Fluoreszenzröhre	10 000 cd/m^2
Blauer Himmel	8 000 cd/m^2
LCD Display	150–500 cd/m^2

Tabelle 2.5: Vergleich von Leuchtdichten verschiedener Lichtquellen

Chamorro et al. zeigen mit einem Experiment der Bestrahlung menschlichen retinalen Pigmentepithel¹¹ mit LED-Licht (468 nm blau, 525 nm grün und 616 nm rot) mit einer jeweiligen Leistung von $5 mW/cm^2$ über zwölf Stunden eine um 75–99 % geringere Lebensfähigkeit der Zellen und einer Erhöhung von DNA-Schäden (Chamorro et al. 2013). Dabei ist kritisch einzuwenden, dass die Zellen direkt aus 20 cm Abstand bestrahlt wurden. Werden diese Werte der Bestrahlungsstärke umgerechnet, ergibt sich ein Wert von $50 W/m^2$, was bei dem angegebenen Abstand zwischen der Lichtquelle und den Zellen einer Beleuchtungsstärke von 33 446 lx D65 Tageslicht entspricht. Die Absorptionsrate der Medien im Auge muss hierbei zusätzlich mitberücksichtigt werden.

2.6.1 Vorgaben und Grenzwerte

Die Norm DIN EN 62471:2009-03 ist eine Anleitung für die Messung und Bewertung der photobiologischen Sicherheit von Lampen und Lampensystemen (Deutsches Institut für Normung e.V. 2009-03-01). Die Norm beinhaltet Emissionsgrenzwerte für photochemische und thermale Netzhautschädigung, die spektrale Gewichtungskurve für Gefährdungen der Netzhaut und die Formel zur Berechnung der Blaulicht-gewichteten Strahldichte. Behar-Cohen weist nach, dass die Grenzwerte und Methoden der DIN EN 62471 mit den Richtlinien der ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection 1998, 2000) übereinstimmen (Behar-Cohen et al. 2011). Die spektrale Gewichtungskurve für Gefährdungen der Netzhaut $B(\lambda)$ folgt in Bild 2.13.

Die Norm DIN EN 62471 unterteilt Lichtquellen in Risikogruppen anhand der Bestrahlungszeit. In Anhang A.3 sind in Tabelle A.2 die Risikogruppen und in Tabelle A.3 die Emissionsgrenzwerte der Risikogruppen aufgelistet. Der Grenzwert für die photochemische Gefährdung der Retina in der Risikogruppe 0 (kein Risiko) beträgt $100 W/(m^2 sr)$ im sichtbaren Wellenlängenbereich (ohne UV und IR) mit einer Expositionszeit von mehr als 10 000 s. Die Blaulicht-gewichtete

¹¹Pigmentepithel ist die äußerste Schicht der Retina.

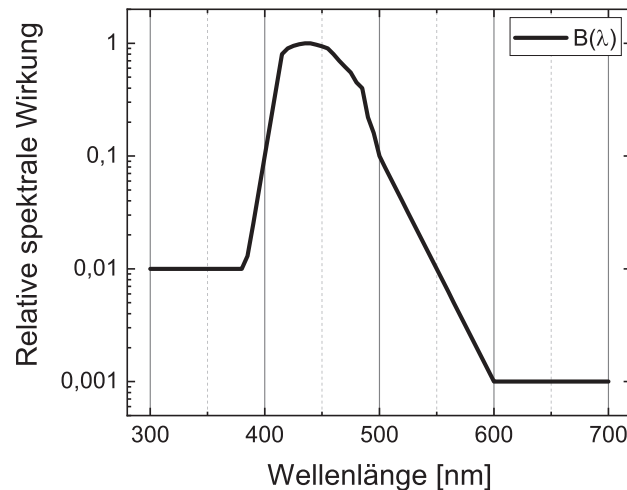


Abbildung 2.13: Spektrale Gewichtungskurve für Gefährdungen der Netzhaut $B(\lambda)$ nach DIN EN 62471 in halblogarithmischer Darstellung

Strahldichte L_B für die Risikogruppe 0 wird nach Formel 2.35 berechnet, wobei die spektrale Strahldichte L_λ einer Lichtquelle mit der Blaulicht-Wirkungsfunktion $B(\lambda)$ multipliziert wird.

$$L_B = \sum_{300nm}^{700nm} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \leq 100 \frac{W}{m^2 \cdot sr} \quad (\text{für } t > 10^4 s) \quad (2.35)$$

Übersteigt die gewichtete Strahldichte L_B , $100 W/(m^2 sr)$, wird die maximale zulässige Bestrahlungsdauer t_{max} nach Formel 2.36 berechnet.

$$t_{max} = \frac{10^6}{L_B} \quad (\text{für } t \leq 10^4 s) \quad (2.36)$$

Die DIN EN 62471 beschreibt die kontrollierten Bedingungen zur optischen Vermessung von Lichtquellen. Zwei Messmethoden werden abhängig von der Gefahrenbewertung definiert. Die Bestrahlungsstärke wird im Abstand von $200 mm$ für die Grenzwerte der Oberfläche der Haut und Hornhaut gemessen. Dazu gehören kleine Blaulichtquellen mit einer Winkelausdehnung von $\alpha < 0,011 rad$. Zur Messung der photochemischen Schädigung der Netzhaut L_B wird die Strahldichte gemessen. Für eine Blaulichtquelle mit einem Grenzwert der Strahldichte von $100 W/(m^2 sr)$ und der Bestrahlungsdauer $\geq 10\,000 s$ ist das zu messende Sichtfeld $0,1 rad$.

Hervorzuheben ist die Aussage von Behar-Cohen et al. über die in den Normen definierten Expositionsgrenzen: Die Toxizitätsgrenze der Lichtstrahlung wurde durch Versuche an Kaninchen und Affen bestimmt. Es wurde ein 10-facher Sicherheitsfaktor hinzugefügt. Berücksichtigt wird bei diesen Grenzwerten ein Schutz vor Photo-Makulopathie durch chronische Lichtexposition. Es kann dadurch im Rückschluss keine Aussage getroffen werden über nicht makroskopisch sichtbare Schäden auf Zellebene und Langzeiteffekte. Ein unentdecktes Risiko für chronische, le-

benslange Lichtexpositionen kann daher nicht ausgeschlossen werden, da photochemische Schädigungen keine sichtbaren Veränderungen hervorrufen, sondern kumulativ einen Verlust von Photorezeptoren induzieren (Behar-Cohen et al. 2011).

2.6.2 Schädigung durch blaues Licht in Displays

Aufgrund der geringen Leuchtdichte von Displays spielen photothermisch-induzierte Schäden wie vorab erläutert keine Rolle. Der Fokus der Betrachtung bei Displaysystemen liegt auf photochemischen Schäden.

Kapitel 2.4.7 beschreibt die am Markt für Computermonitore verwendeten Methoden der Hersteller von Displays an mit einer „Low-Blue Light“ Option (ASUS 2015; BenQ 2013; Fujitsu 2018; Philips 2015; SAMSUNG 2015; ViewSonic 2015). Die Motivation dieser Hersteller, den Blaulichtanteil in Monitoren zu reduzieren, sind mögliche Blaulicht-induzierter Schädigungen ihrer Kunden zu vermeiden. In Kapitel 3.4 werden Messungen zur Evaluierung Blaulicht-induzierter Schäden durch Displays durchgeführt.

Der TÜV Rheinland vergibt ein Zertifikat über Blaulicht-reduzierte Displays (TÜV Rheinland 2015)¹². Das Zertifikat des TÜV Rheinland umfasst folgende Kriterien, die ein Display erfüllen muss:

- Einhaltung der Grenzwerte aus der DIN EN 62471 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2009-03-01) zur photobiologischen Sicherheit von Lampen und Lampensystemen.
- Keine Emission im UV-Bereich bzw. unter einer Wellenlänge von 380 nm.
- Die Bandbreite von ± 20 nm um den Blau-Peak darf maximal 20 % der Leistung des gesamten Emissionsspektrums ausmachen.
- Die maximale Leuchtdichte im Blaubereich darf nicht mehr als doppelt so hoch sein wie der maximale Peak in einem anderen Farbbereich.
- Das Benutzerhandbuch des Bildschirms muss den Hintergrund zur Low Blue Light Option erklären und der Zugang auf diesen Modus muss leicht zu erreichen sein.

Durch die fehlenden Angaben von Literaturquellen im Zertifikat des TÜV Rheinlands können die Kriterien nicht nachvollzogen werden. Einzig die Grenzwerte der Norm DIN EN 62471 sind

¹²Referenziert ist die Pressemitteilung des TÜV Rheinland zum Low-Blue Light Zertifikat. Das Dokument mit den Zertifikatskriterien ist öffentlich nicht zugänglich, auf Anfrage beim TÜV Rheinland jedoch erhältlich

bekannt. Das Zertifikat des TÜV Rheinland enthält keine Informationen in Bezug auf die nicht-visuelle Lichtwirkung.

Kim et. al. vergleichen die spektrale Lichtverteilung von Displays mit weißen LEDs, RGB-LEDs und mit CCFL Hintergrundbeleuchtung. Die Autoren zeigen auf, dass eine Hintergrundbeleuchtung mit weißen LEDs mit einem Peak bei 450 nm spektral das größte Potential Blaulicht-induzierter Schäden aufweist (Kim et al. 2015).

Qiao et al. befassen sich mit der photobiologischen Sicherheit von elektronischen Anzeigesystemen. In der Arbeit wird die Norm IEC 62471, die internationale Version der DIN EN 62471, zur Eingruppierung von Projektionssystemen in die Risikogruppen der Norm angewendet. Es kann gezeigt werden, dass konventionelle optische Messungen mit einem Leuchtdichtemessgerät einen systembedingten Fehler produzieren. Der Autor schlägt ein optisches Abbildungssystem vor, das mehr dem menschlichen Auge entspricht. Dabei sollte der Durchmesser eines Messsystems 7 mm betragen anstelle der für diese Messgeräte üblichen $30\text{-}50\text{ mm}$. Es wird ein Unterschied zwischen verschiedenen Eingangs-Aperturen (7 mm - 50 mm) aufgezeigt. Bei Leuchtdichtemessgeräten mit einem Sichtfeld von 0.1° , 0.2° , 1° , oder 2° kann bei jeden 10 mrad im Sichtfeld ein Fehler bis zu 50% entstehen (Qiao et al. 2016).

2.7 Fazit und Defizite der Forschung und Praxis

Die bisherige Forschung betrachtete die nicht-visuelle Lichtwirkung und die Farbwahrnehmung von Displaysystemen unabhängig voneinander. Kapitel 2.5 verdeutlicht die physiologische und psychologische Wirkung des Lichts auf den Menschen. Der Kenntnisstand auf Basis vorhandener Literatur zur nicht-visuellen Lichtwirkung von Displays (Kapitel 2.5.6) zeigt signifikante Einflüsse auf die Melatoninsuppression abhängig von der am Auge ankommenden Beleuchtungsstärke, der spektralen Zusammensetzung (Blauanteil $450\text{-}490\text{ nm}$) und der gesamten Lichtexposition über den Tag (Lichthistorie). Je größer die Leuchtdichte und Farbtemperatur, je weniger Beleuchtungsintensität am Tag, je näher der Abstand und je größer die Diagonale eines Displays sind, desto größer ist der physiologische Effekt.

Zusammenfassend kann die nicht-visuellen Lichtwirkung von Displays mit folgenden Abhängigkeiten dargestellt werden: Die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtungsstärke am Auge, die Lichthistorie und der betrachtete Raumwinkel eines Displays sind maßgebende Einflussfaktoren für die nicht-visuelle Lichtwirkung von Displays.

Die heute bekannten und genutzten Verfahren zur Reduzierung des Blaulichtanteils in Displays basieren auf einer softwaregesteuerten Veränderung der angezeigten Bildinhalte durch unterschiedliche Mischung der roten, grünen und blauen Pixel des Anzeigepanel. Die Hinterleuchtung dieser Displaypanels wird im Gesamten gedimmt, um die Helligkeit des Displays zu steuern. Der Weißpunkt dieser Displays wird auf die Schwarzkörperkurve der CIE-Normfarbtafel angepasst und in Richtung wärmerer Lichtfarben verschoben.

Das Defizit dieses Ansatzes, der auf der Reduzierung des Blaulichtanteils basiert, ist eine deutlich messbare und wahrnehmbare Veränderung der dargestellten Bildinhalte durch die Verschiebung der Farborte. Einzelne Farben, besonders Weißtöne und jene mit hohen blauen und grünen Anteilen, werden bei diesem Verfahren verfälscht dargestellt. Die Folgen dieser Veränderung der Displayinhalte auf die Wahrnehmung und Akzeptanz der Nutzer werden nach heutigem Kenntnisstand in der Literatur nicht betrachtet.

Die beiden Patente WO 2010/072415 A1 (Bues et al. 2010) und WO 2017/137756 A1 (Lucas und Allen 2017) verfolgen den Ansatz der spektralen Verschiebung der Peak-Wellenlänge und die Verwendung von mehr als drei Primärfarben. Allen et al. zeigen mit einem physiologischen Experiment, dass die Darstellung metamerer Bildinhalte auf einem projektionsbasierten Display (Umsetzung Patent WO 2017/137756 A1) eine unterschiedliche Melatoninunterdrückung zur Folge hat. Dazu ist kritisch anzumerken, dass das Lichtspektrum mit geringer nicht-visueller Lichtwirkung des Projektionssystems minimale Grünanteile enthält (Abbildung 2.11: Rote Kurve) und auf zwei Primärfarben (Cyan und Gelb) beruht. Die Vermutung liegt nahe, ohne diese überprüfen zu können, dass Bildinhalte mit grünen Anteilen mit dieser Methode verfälscht dargestellt werden. Die im Patent dargestellte Umrechnung zwischen zwei Bildinhalten zweier unterschiedlicher Farbräume mit Hilfe einer Meta-Helligkeit ist ein Ansatz, um den Weißpunkt beider Spektren metamer darzustellen. Dabei stellt sich allerdings die Frage, wie sich gesättigte Farben mit dieser Methode verändern. Dies wird in dieser Arbeit in Kapitel 4.2 diskutiert. Die Untersuchung von Allen et al. liefert jedoch den physiologischen Nachweis, dass Displaysysteme mit unterschiedlicher, aber metamerer spektraler Zusammensetzung realisiert werden können, die eine unterschiedliche nicht-visuelle Lichtwirkung besitzen (Allen et al. 2018).

Aus den aufgezeigten Defiziten lässt sich die Notwendigkeit einer kombinierten Betrachtung eines variablen Lichtspektrums zur Displayhinterleuchtung in Kombination mit möglichst gleichbleibenden dargestellten Farben ableiten. Die motivierenden Erkenntnisse für diese Arbeit ist: Die spektrale Veränderung der Hintergrundbeleuchtung zur Reduzierung der zirkadianen Einflüsse verändert die farbliche Zusammensetzung der Bildinhalte. Dieser Effekt ist die Folge sowohl bei Reduzierung des Blaulichtanteils als auch bei der spektrale Verschiebung der Peak-Wellenlänge der Primärfarben. Diese Veränderung der Farbdarstellung gilt es hinsichtlich der Wahrnehmung und Akzeptanz der Nutzer zu untersuchen und zu minimieren.

3 Forschungsfragen und experimentelles Vorgehen

Ausgehend vom Stand der Forschung und Praxis und den dort dargestellten Defiziten sowie der Zielsetzung dieser Arbeit werden folgende Forschungsfragen formuliert:

- Welche Eigenschaften und welche spektrale Zusammensetzung muss ein Display zur Unterstützung des menschlichen Tag-Nacht-Rhythmus haben?
- Wie werden die Bildinhalte eines Displays wahrgenommen, wenn sich die spektrale Zusammensetzung der Displayhintergrundbeleuchtung ändert?

Zur Präzisierung der Forschungsfragen und zur Analyse und Quantifizierung der Defizite des Stands der Forschung und Praxis werden vor der Methodenentwicklung vier Experimente durchgeführt:

- Experiment 1 dient der Ermittlung der nicht-visuellen Bewertungsmethode für Display-systeme in dieser Arbeit.
- Experiment 2 verdeutlicht die Verschiebung der Farborte bei der Reduzierung der blauen Lichtanteile in Displays.
- Experiment 3 zeigt die Anteile des Displaylichts im Verhältnis zur Allgemeinbeleuchtung und des Tageslichts in Büroumgebungen und dessen nicht-visuelle Lichtwirkung.
- Experiment 4 diskutiert die photobiologische Verträglichkeit der blauen Lichtanteile in Displays.

Aus den Ergebnissen der vier Experimente wird in Kapitel 4 eine Methode zur Displayhintergrundbeleuchtung entwickelt, die das menschliche nicht-visuelle System unterstützt.

3.1 Experiment 1: Nicht-visuelle Bewertungsmethoden für Displays

Es existieren viele nicht-visuelle Bewertungsmethoden (Kapitel 2.5.5), denen allesamt die Wirkungsfunktionen von Brainard et al. und Thapan et al. zugrunde liegen (Brainard et al. 2001; Thapan et al. 2001). Durch unterschiedliche mathematische Modelle und Gewichtungsfunktionen sowie die Einbindung visueller Aspekte in die Bewertungsmethoden variieren die Ergebnisse der in Kapitel 2.5.5 aufgezeigten Methoden voneinander.

In dem folgenden Abschnitt werden die bekannten nicht-visuellen Bewertungsmethoden aus Kapitel 2.5.5 auf die Ergebnisse der IAO-UPK-Studie angewendet. Die Ergebnisse der IAO-UPK-Studie zeigen einen Zusammenhang zwischen dem Lichtspektrum eines Displays und dem physiologischen Einfluss auf die Melatoninkonzentration (Cajochen et al. 2011; Stefani et al. 2010b). Aus der Vielzahl der Methoden wird jene ausgewählt und im weiteren Verlauf dieser Arbeit angewendet, welche die präziseste Vorhersage der Melatoninunterdrückung liefert.

3.1.1 Auswahl der nicht-visuellen Bewertungsmethode für Displays

Abbildung 3.1(a) stellt das Spektrum der beiden untersuchten Displays der IAO-UPK-Studie dar. In Abbildung 3.1(b) sind die Ergebnisse der im Speichel gemessenen Melatoninkonzentration zu sehen. Die Ergebnisse der Messungen zeigen eine signifikante Melatoninsuppression bei Nutzern von LED-Displays und eine daraus folgende Verschiebung der inneren Uhr um 30 bis 60 Minuten. Die Konzentration des Melatonins während der „Baseline“ (17:45 – 18:45 Uhr) gefolgt von der Dunkeladaptation (19:15 Uhr) und der fünf Stunden Lichtexposition des Displays ergab einen signifikanten Effekt der Displays ($F_{1,11} = 0,9; p = 0,045$), der Tageszeit ($F_{12,132} = 137,5; p = 0,0001$) und der Interaktion Display gegen Tageszeit ($F_{12,132} = 3,0; p = 0,041$) (Cajochen et al. 2011). Der abendliche Anstieg des Melatoninspiegels im Speichel wurde unterdrückt und stieg später unter der Einwirkung des LED Displays im Vergleich zum CCFL Display. Signifikante Unterschiede in der Melatoninkonzentration wurden zu folgenden Zeitpunkten gemessen: 21:15 Uhr, 22:15 Uhr, 22:45 Uhr und 23:15 Uhr (Post-hoc-Test mit einfaktorieller ANOVA; $p = 0,04$).

Tabelle 3.1 zeigt die Mittelwerte der Melatoninkonzentration der Abbildung 3.1(b) aller Probanden der Studie. Der Quotient wird berechnet aus dem Wert des LED-Displays geteilt durch den Wert des CCFL-Displays. Der Quotient zeigt in dieser Tabelle die Konzentration des Melatonins bei dem LED-Display als Anteil zum CCFL-Display.

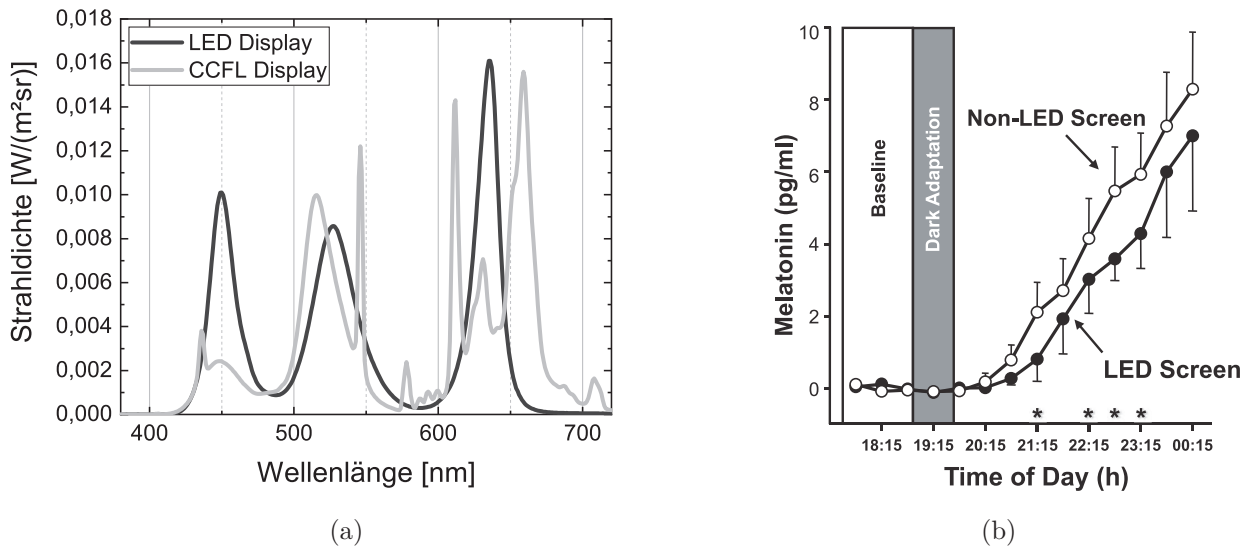


Abbildung 3.1: Spektren der beiden untersuchten Displays (a) und der Melatoninkonzentration im Speichel (b) aus Cajochen et al. (Cajochen et al. 2011)

Uhrzeit [hh:mm]	Melatonin im Speichel		Quotient (LED/CCFL)
	CCFL	LED	
21:15	2,2 pg/ml	0,85 pg/ml	38,6 %
21:45	2,7 pg/ml	1,95 pg/ml	72,2 %
22:15	4,2 pg/ml	3,05 pg/ml	72,6 %
22:45	5,5 pg/ml	3,60 pg/ml	65,5 %
23:15	5,9 pg/ml	4,3 pg/ml	72,9 %
23:45	7,3 pg/ml	6,0 pg/ml	82,2 %
00:15	8,3 pg/ml	7,0 pg/ml	84,3 %

Tabelle 3.1: Gemessene Melatoninkonzentration zwischen 21:15 Uhr und 00:15 Uhr der IAO-UPK-Studie (Cajochen et al. 2011)

Tabelle 3.2 listet die photometrischen Messungen der beiden Displays sowie die Ergebnisse der nicht-visuellen Bewertungsmethoden auf. Der Quotient ist der Wert des CCFL-Displays geteilt durch den Wert des LED-Displays. Da bei der Melatoninkonzentration der Wert des LED Displays geringer ist als der des CCFL-Displays, wird davon ausgegangen, dass der Wert der Bewertungsmethode zur Unterdrückung des Melatonins im LED-Display größer ist als der Wert des CCFL-Displays. Aus diesem Grund sind der Dividend und Divisor in den beiden Tabellen vertauscht.

Display Backlight	HP LP2480zx	HP LP2475w	Quotient (CCFL/LED)
	LED	CCFL	
Beleuchtungsstärke [lx]	110	110	-
Leuchtdichte [cd/m^2]	250	250	-
Farbtemperatur [K]	6 653	4 775	-
$E_{V,mel,D65}$ (MDEI) [lx]	109,08	92,40	84,7 %
$a_{mel,v}$	0,898	0,761	84,7 %
$E_{e,z}$ (Melanopic) [$\mu W/cm^2$]	14,47	12,26	84,7 %
$E_{e,lc}$ (Erythropic) [$\mu W/cm^2$]	18,41	18,34	99,7 %
$E_{e,mc}$ (Chloropic) [$\mu W/cm^2$]	17,57	17,0	96,9 %
$E_{e,sc}$ (Cyanopic) [$\mu W/cm^2$]	9,23	3,72	40,4 %
$E_{e,r}$ (Rhodopic) [$\mu W/cm^2$]	17,67	15,96	90,3 %
MSI	0,8477	0,5638	66,5 %
Circadian Light (CL_a)	158	181	114,6 %
Circadian Stimulus (CS)	0,203	0,226	111,3 %

Tabelle 3.2: Zirkadiane Bewertung der IAO-UPK-Studie

Bei identischer Beleuchtungsstärke von $110 lx$ am Auge mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung wird der Unterschied zwischen den Bewertungsmethoden verdeutlicht. Der physiologische Nachweis, dass das Spektrum des LED-beleuchteten Displays stärker Melatonin unterdrückt als das Spektrum des CCFL-Displays, zeigt sich in den gemessenen Daten in Tabelle 3.1. Die Bewertungsmethode nach DIN SPEC 5031-100 zeigt folgende Ergebnisse: Der MDEI ist bei dem LED-Display $109,08 lx$ und bei dem CCFL-Display $92,40 lx$. Der melanopische Wirkungsfaktor ist bei dem LED-Display $a_{mel,v} = 0,898$ und bei dem CCFL-Display $a_{mel,v} = 0,761$. Die prozentuale Änderung ergibt einen Wert des CCFL-Displays von 84,7 % des LED-Displays. Das ist eine Reduzierung von 15,3 %.

Die Betrachtung der Anregung der Photorezeptoren liefert für den Wert „Melanopic“ ebenfalls eine Reduktion um 15,3 %. Die roten (Erythropic) und grünen (Chloropic) Rezeptoren unterscheiden sich nur gering. Der größte Unterschied ist bei den blauen (Cyanopic) Photorezeptoren zu sehen. Der Anteil des Wertes des CCFL-Displays von dem LED-Display ist 40,4 %. Dies ist eine Reduktion um 59,6 %. Die Stäbchen (Rhodopic) sind um 9,7 % geringer angeregt.

Bei dem „Melanopic Suppression Index“ MSI ist der Anteil des CCFL-Displays 66,5 % des LED-Displays. Dies ist eine Reduktion von 33,5 %. Der Wert des „Circadian Light“ CL_a und des „Circadian Stimulus“ (CS) widersprechen den Ergebnissen der Melatoninsuppression.

Bei dem „Circadian Light“ CL_a ist der Wert des CCFL-Displays 14,6 % größer als der des LED-Displays. Der Wert des „Circadian Stimulus“ CS ist 11,3 % größer.

3.1.2 Diskussion der nicht-visuellen Bewertung von Displaysystemen

Die Ergebnisse der IAO-UPK-Studie zeigen bei der abendlichen Beleuchtung mit einem LED-Display eine abgeschwächte Schläfrigkeit und Melatoninkonzentration im Speichel bei gleichzeitiger Zunahme der kognitiven Leistung (Cajochen et al. 2011). Aus den Ergebnissen der Studie wird ein Zusammenhang zwischen der Melatoninunterdrückung und des Spektrums der beiden Displaysysteme abgeleitet.

Die Anwendung der zirkadianen Bewertungsmethoden aus der Zusammenfassung in Kapitel 2.5.5 auf diese Studie liefert unterschiedliche Ergebnisse. Trotz der Signifikanz des Unterschieds der Melatoninsuppression zwischen den Displays ($p=0,045$), ist dieser Wert nahe an der Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %. Die relative Verringerung der Melatoninkonzentration zwischen 21:15 und 00:15 Uhr ist minimal 15,7 % und maximal 61,4 %; wobei von den acht angegebenen Werten der Wert um 21:15 Uhr einen größeren Unterschied zum Maximalwert von 61,4 % darstellt. Die anderen sieben Werte liegen alle zwischen 34,5 % und 15,7 %. Die zirkadianen Bewertungsmethoden, basierend auf dem Wirkungsspektrum für die Melatoninsuppression, liefern die genauesten Vorhersagen. Der MDEI, $a_{mel,v}$ und der $E_{e,z}$ (Melanopic) Wert sind mit einer Reduzierung von 15,3 % hinreichend genau. Ebenfalls liefert der MSI-Wert mit einer Reduzierung um 33,5 % ein hinreichend genaues Ergebnis.

Die Methoden des „Circadian Stimulus“ (CS) und „Circadian Light“ CL_a widersprechen den Ergebnissen der Melatoninsuppression. Laut diesen Methoden ist die Melatoninsuppression im CCFL-Display größer als die im LED-Display. Dies lässt sich auf die in Anhang A.2.2 beschriebene Problematik der Sprungfunktion zurückführen, da die Farbtemperatur des CCFL-Displays in diesem Bereich liegt.

3.2 Experiment 2: Farbraum und nicht-visuelle Lichtwirkung bei Blaulichtreduzierung

Im Stand der Forschung und Praxis in Kapitel 2.4.7 wird gezeigt, dass diverse Hersteller Displaysysteme anbieten, die gezielt den Blaulichtanteil reduzieren können mit der Prämisse, die schädliche Wirkung des Blaulichts zu reduzieren (vgl. Kapitel 2.6.2). Darüber hinaus gibt es Hersteller von Smartphones, Tabletcomputern und Computern, sowie Softwarehersteller, die gezielt das blaue Licht in Displays reduzieren, um in der Nacht keine Störung des zirkadianen Systems zu verursachen (vgl. Kapitel 2.4.7).

Diese Methoden zur Reduzierung des Blaulichtanteils basieren auf der Herausfilterung des Blaulichtanteils durch das LC-Panel. Im Folgenden wird dargestellt, wie sich diese Blaulichtreduzierung auf den dargebotenen Farbraum auswirkt und welche Ergebnisse diese Methoden mithilfe der nicht-visuellen Bewertungsmethoden liefern.

3.2.1 Methode und Versuchsaufbau

Es werden vier Büromonitore und ein Tabletcomputer untersucht. Die Büromonitore werden sowohl mit deren integrierter Blaulichtreduktion als auch mit einer zusätzlichen Software getrennt vermessen. Folgenden LC-Displays mit LED-Hintergrundbeleuchtung werden optisch vermessen und bewertet:

- **ASUS MX27AQ**: 27 Zoll Display mit 2560 x 1440 Pixel Auflösung; max. Leuchtdichte: 300 cd/m^2 . Fünf Stufen Blaulichtreduktion sind aktivierbar (Hettinger et al. 2018-03-31):
 - Stufe 0: Standard Modus
 - Stufe 1: Reduktion des Blaulichtanteils um 20 %;
 - Stufe 2: Reduktion des Blaulichtanteils um 30 %;
 - Stufe 3: Reduktion des Blaulichtanteils um 50 %;
 - Stufe 4: Reduktion des Blaulichtanteils um 70 %;
- **Fujitsu P27T-7**: 27 Zoll Display mit 2560 x 1440 Pixel Auflösung; max. Leuchtdichte: 350 cd/m^2 . Einschaltbarer „Low Blue Light“ Modus (Hettinger et al. 2018-03-31)
- **Eizo EV2436W**: 24 Zoll Display mit 1920 x 1200 Pixel Auflösung; max. Leuchtdichte: 300 cd/m^2

- **Samsung BX2240:** 21,5 Zoll Display mit 1920 x 1080 Pixel Auflösung; max. Leuchtdichte: 253 cd/m^2 (Hettinger et al. 2018-03-31)
- **Apple iPad Air:** 9,7 Zoll Display mit 2048 x 1536 Pixel Auflösung; stufenlos einstellbarer „Night Shift Modus“ zur Reduzierung des Blaulichts

Die Software zur Reduzierung des Blaulichtanteils dieses Experiments ist f.lux Version 4.66 (Flux Software LLC 2018). Die Software wird mit den vier genannten Büromonitoren jeweils ohne deren integrierte Blaulichtreduktion verwendet. Folgende Einstellung werden bei der Software f.lux vermessen:

- f.lux 6 500 *K* (Daylight)
- f.lux 5 500 *K* (Sunlight)
- f.lux 4 200 *K* (Fluorescent)
- f.lux 3 400 *K* (Halogen)
- f.lux 2 700 *K* (Incandescent)
- f.lux 2 300 *K* (Dim Incandescent)
- f.lux 1 900 *K* (Candle)

Die Messungen der spektralen Leuchtdichte der Displays basieren auf dem „Information Display Measurements Standard“ (ICDM) (Society for Information Display 2012). Die Messungen werden mit dem Konica Minolta CS-2000A (Anhang C.1.3) in 50 *cm* Abstand in einem dunklen Raum ohne Lichtquellen durchgeführt. Das Spektralradiometer wird senkrecht zur Mitte des Displays ausgerichtet. Der Messwinkel wird auf 1° eingestellt. Der Bildinhalt zur Durchführung der Messung ist ein jeweils maximal gesättigtes rotes, grünes, blaues, schwarzes und weißes Bild.

Zur Messung der spektralen Beleuchtungsstärke am Auge wird das Gigahertz-Optik BTS256-LED mit Streuscheibenadapter (Anhang C.1.1) verwendet. In 70 *cm* Abstand, senkrecht zum Display wird repräsentativ zur Position der Augen des Displaynutzers die Messung durchgeführt. Anhang C.2 beschreibt den Messaufbau im Detail.

Der Tabletcomputer iPad Air wird in 25,4 *cm* (10 Zoll) Abstand gemessen. Dieser Abstand entspricht dem Experiment von Wood et al. (Wood et al. 2013). Die Messung wird mit einem maximal weißen vollflächigen Bild durchgeführt. Aus der Messung der spektralen Beleuchtungsstärke am Auge werden die zirkadianen Messgrößen des MDEI und des $a_{mel,v}$ nach Kapitel 2.5.5 berechnet.

Einstellung	Weißpunkt		Gamut		$E_{v,Auge}$ [lx]	MDEI [melan. lx]	$a_{mel,v}$
	u'	v'	[%]	[rel. %]			
Standard	0,1997	0,4735	33,81	100	53,53	46,01	0,779
Filter Stufe 3	0,2019	0,4938	33,70	99,69	52,21	38,94	0,676
Filter Stufe 4	0,2030	0,4969	33,74	99,79	22,41	16,43	0,665
f.lux 3 400 K	0,2402	0,5194	33,08	97,85	33,94	18,71	0,499
f.lux 2 700 K	0,2677	0,5320	31,81	94,10	28,84	11,22	0,394
f.lux 1 900 K	0,3242	0,5398	23,52	69,56	16,76	4,58	0,248

Tabelle 3.3: Ergebnisse Asus MX27AQ

Die Gamut-Fläche wird nach Kapitel 2.4.3 berechnet und als prozentuale Fläche des gesamten wahrnehmbaren Farbraumes angegeben (Blankenbach 2016a). Es wird zusätzlich die relative Gamut-Fläche angegeben, bezogen auf die Standardeinstellung des jeweiligen Displays.

3.2.2 Ergebnisse der Messungen

Der Büromonitor Asus MX27AQ besitzt mit vier Stufen Blaulichtfilterung die größte Anzahl von Einstellungen unter den gemessenen Modellen. Alle Stufen der Blaulichtfilterung haben nur minimalen Einfluss auf den dargestellten Farbraum. Einzig der Weißpunkt weicht von der Standardeinstellung ab. Aus diesem Grund wird in der Abbildung nur die Stufe 4 dargestellt, die Maximaleinstellung. Die Verwendung der f.lux Software zeigt einen Einfluss auf den darzustellenden Farbraum und den Farbort des Weißpunktes. Abbildung 3.2(a) zeigt die gemessenen Farbräume und Weißpunkte (W) für die Standardeinstellung, Blaulichtfilter Stufe 4, die Einstellungen der f.lux-Software für 3 400 K, f.lux 2 700 K und f.lux 1 900 K. Die Wahl einer höheren Farbtemperatur hat keinen Einfluss auf den Farbraum, einzig der Weißpunkt wird verändert. Tabelle 3.3 listet die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen des Asus MX27AQ auf. Es wird der gemessene Weißpunkt, die Absolute- und Relative-Gamut-Fläche, die Beleuchtungsstärke und der MDEI und der $a_{mel,v}$ angegeben.

Der Büromonitor Fujitsu P27T-7 besitzt eine „Low Blue Light“ Option. Abbildung 3.3(b) stellt die Ergebnisse der Farbraummessungen und Weißpunkte dar. Tabelle 3.4 listet die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen des Fujitsu P27T-7 auf.

Die Büromonitore Eizo EV2436W und Samsung BX2240 haben keine Option zur Reduzierung des Blaulichtanteils. Bei diesen Monitoren wird der Standardmodus mit den drei Einstellungen für f.lux gemessen. Abbildung 3.3(c) stellt die Ergebnisse der Farbraummessungen und Weiß-

Einstellung	Weißpunkt		Gamut		$E_{v,Auge}$ [lx]	MDEI [melan. lx]	$a_{mel,v}$
	u'	v'	[%]	[rel. %]			
Standard	0,2002	0,4618	35,6	100	111,06	97,54	0,796
Low Blue Light	0,2083	0,4830	35,31	99,20	99,38	74,85	0,682
f.lux 3 400 K	0,2347	0,5059	35,11	98,63	73,95	43,42	0,532
f.lux 2 700 K	0,2543	0,5253	34,75	97,61	60,16	28,11	0,423
f.lux 1 900 K	0,3005	0,5432	30,33	85,21	42,23	12,90	0,277

Tabelle 3.4: Ergebnisse Fujitsu P27T-7

Einstellung	Weißpunkt		Gamut		$E_{v,Auge}$ [lx]	MDEI [melan. lx]	$a_{mel,v}$
	u'	v'	[%]	[rel. %]			
Standard	0,1983	0,4642	33,37	100	69,90	60,35	0,782
f.lux 3 400 K	0,2389	0,5131	33,22	99,55	42,78	24,30	0,515
f.lux 2 700 K	0,2630	0,5255	32,73	98,08	33,00	15,18	0,417
f.lux 1 900 K	0,3156	0,5378	26,63	79,80	22,03	6,88	0,283

Tabelle 3.5: Ergebnisse Eizo EV2436W

punkte des Eizo EV2436W Monitors und Abbildung 3.3(d) die des Samsung BX2240 Monitor dar. Tabelle 3.5 listet die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen des Eizo EV2436W und Tabelle 3.6 die Ergebnisse des Samsung BX2240 auf.

Der Tabletcomputer iPad Air besitzt eine „Night Shift“-Option. Abbildung 3.3 stellt die Ergebnisse der Farbraummessungen und Weißpunkte dar. Tabelle 3.7 listet die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen des iPad Air auf. Es wird die Standardeinstellung und von der „Night Shift“ Option die Einstellung „low“, „middle“ und „high“ gemessen. Anders als bei den Büromonitoren wird bei diesem Gerät nicht nur der Blauanteil reduziert, sondern auch der Grünanteil wird kleiner, je höher die „Night Shift“ Option gewählt wird.

Einstellung	Weißpunkt		Gamut		$E_{v,Auge}$ [lx]	MDEI [melan. lx]	$a_{mel,v}$
	u'	v'	[%]	[rel. %]			
Standard	0,1935	0,4547	30,25	100	39,14	37,49	0,868
f.lux 3 400 K	0,2256	0,5156	31,52	104,18	26,54	16,79	0,573
f.lux 2 700 K	0,2516	0,5329	30,7	101,47	21,61	10,48	0,439
f.lux 1 900 K	0,3028	0,5438	16,56	54,75	15,02	5,41	0,296

Tabelle 3.6: Ergebnisse Samsung BX2240

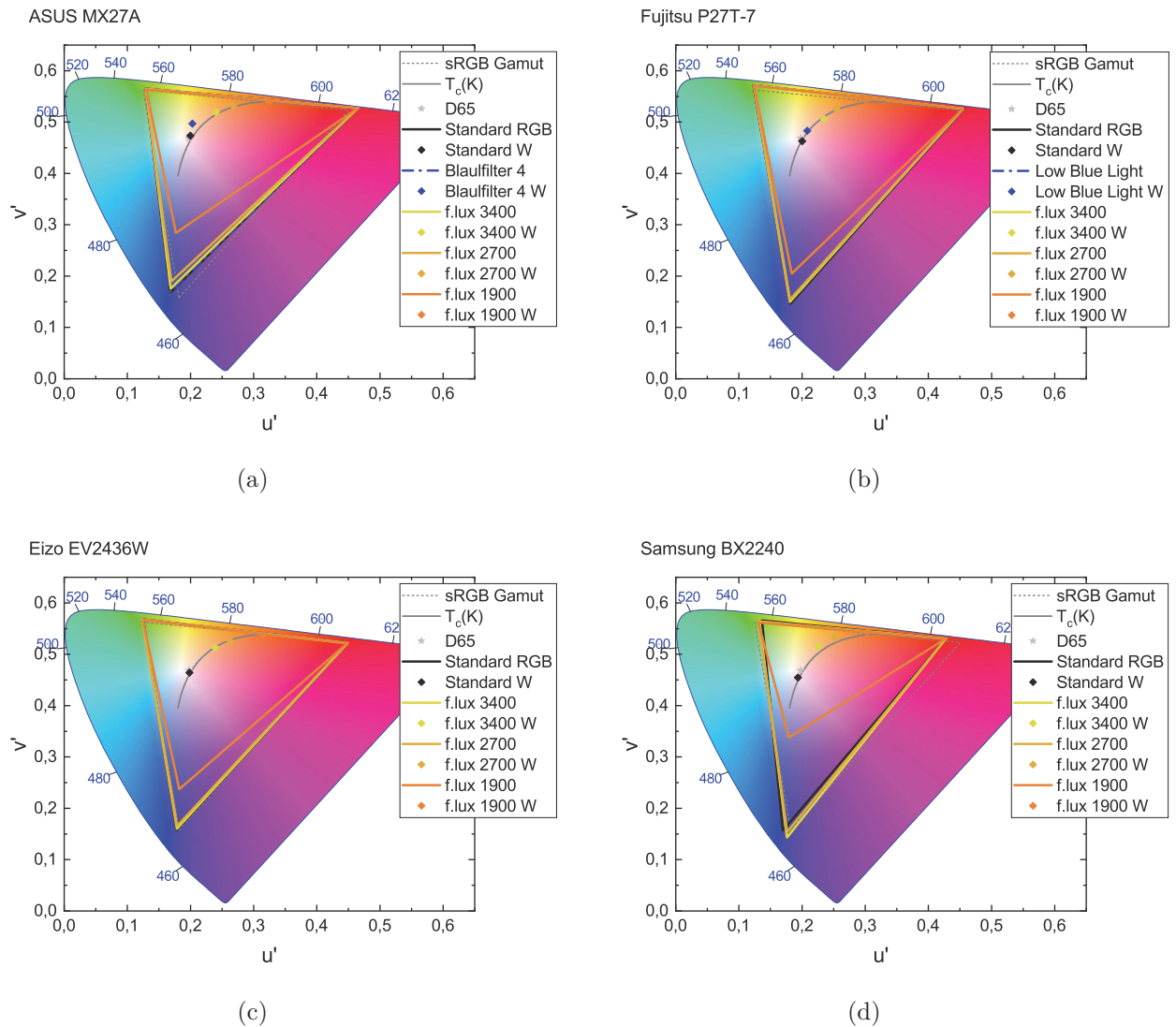


Abbildung 3.2: Darstellung der Farbräume der gemessenen Büromonitore: ASUS MX27AQ (a); Fujitsu P27T-7 (b); Eizo EV2436W (c); Samsung BX2240 (d)

Einstellung	Weißpunkt		Gamut		$E_{v,Auge}$ [lx]	MDEI [melan. lx]	$a_{mel,v}$
	u'	v'	[%]	[rel. %]			
Standard	0,1947	0,4631	32,73	100	115,5	97,45	0,764
Night Shift low	0,2003	0,4756	31,94	97,59	105,2	81,18	0,699
Night Shift middle	0,2205	0,5029	28,48	87,01	82,92	50,61	0,553
Night Shift high	0,2587	0,5312	22,03	67,31	59,05	24,18	0,371

Tabelle 3.7: Ergebnisse Apple iPad Air

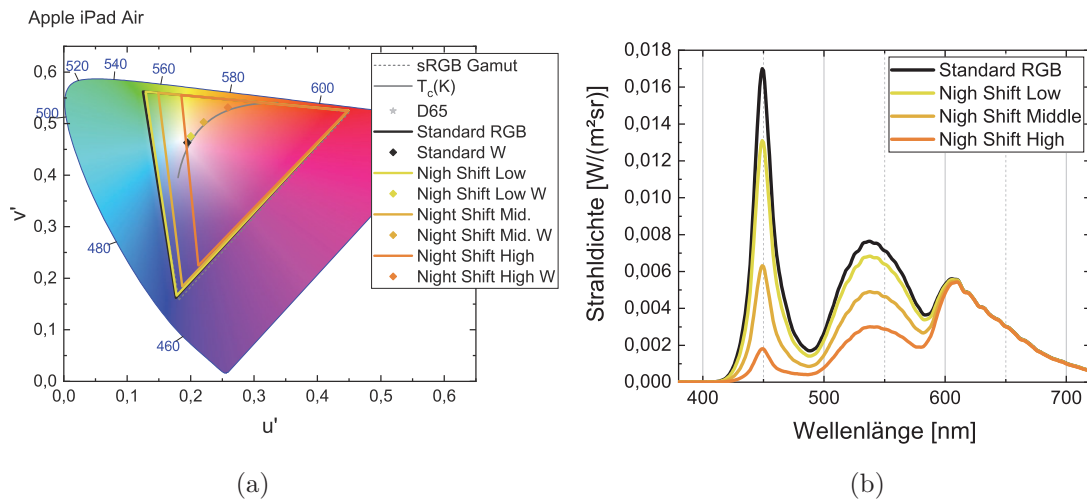


Abbildung 3.3: Darstellung der Farbräume (a) und Spektren (b) des iPad Air 2 inklusive des „Night Shift Modus“

3.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Messungen der vier Büromonitore liefern in Kombination mit der f.lux Software ähnliche Ergebnisse. In der Einstellung f.lux 3 400 K und f.lux 2 700 K ist der Farbraum nahezu identisch mit dem Farbraum der jeweiligen Standardeinstellung (Maximal 2 % Abweichung). In beiden Einstellungen ist der Weißpunkt am angegebenen Farbort der Farbtemperatur aus der Bezeichnung der f.lux-Stufe. Abbildung 3.4 zeigt die Bildschirminhalte eines Monitors mit der f.lux Software in den Einstellungen 6 500 K, 3 400 K, 2 700 K und 1 900 K. Ein orangener Schleier ist über dem Bildinhalt zu erkennen. Die Beleuchtungsstärke am Auge und der MDEI verringern sich in den vier Modellen ebenfalls auf ähnliche Weise. In der Einstellung f.lux 3 400 K ist die Beleuchtungsstärke zwischen 29 % und 37 % und der MDEI zwischen 55 % und 60 % geringer als in der Standardeinstellung. Der $a_{mel,v}$ ist zwischen 33 % und 37 % geringer. In der Einstellung f.lux 2 700 K ist die Beleuchtungsstärke zwischen 47 % und 53 % und der MDEI zwischen 71 % und 75 % geringer als in der Standardeinstellung. Der $a_{mel,v}$ ist zwischen 46 % und 49 % geringer. Die Einstellung f.lux 1 900 K wird aufgrund des orangenen Bildes und der deutlich wahrnehmbaren Verkleinerung des Farbraumes nicht weiter betrachtet.

Der Asus Monitor mit den vier integrierten Stufen der Blaulichtfilterung zeigt in der Stufe 3 eine minimale Verringerung der Beleuchtungsstärke am Auge (2,5 %) und eine Verringerung des MDEI von 15 % und des $a_{mel,v}$ von 13 %. In Stufe 4 ist die Beleuchtungsstärke 58 %, der MDEI 64 % und der $a_{mel,v}$ 14,6 % geringer. Die „Low Blue Light“ Option des Fujitsu Monitors verringert die Beleuchtungsstärke um 11,5 %, den MDEI um 23,3 % und den $a_{mel,v}$ um 14,3 %. Die Änderung des Farbraumes ist kleiner 1 %. Der Weißpunkt verschiebt sich wahrnehmbar in Richtung einer wärmeren Lichtfarbe.

Der „Night Shift“ Modus des iPad Air bietet eine stufenlose Einstellung an. In der geringsten Stufe (low) ist die Beleuchtungsstärke um 9 %, der MDEI um 16,7 %, der $a_{mel,v}$ um 8,5 % und der Farbraum etwa 2,5 % geringer. Der Weißpunkt hat eine gemessene Farbtemperatur von 5 966 K im Gegensatz zum Standardwert von 7 078 K. In der mittleren Stufe (middle) ist die Beleuchtungsstärke um 28,2 %, der MDEI um 48,1 %, der $a_{mel,v}$ um 27,6 % und der Farbraum um 13 % geringer. Der Weißpunkt ist nahe dem im Standardmodus. Der Weißpunkt hat eine gemessene Farbtemperatur von 4 151 K. In der höchsten Stufe (high) ist die Beleuchtungsstärke um 48,9 %, der MDEI um 75,2 %, der $a_{mel,v}$ um 51,4 % und der Farbraum um etwa 33 % geringer. Der Weißpunkt hat eine gemessene Farbtemperatur von 2 770 K.

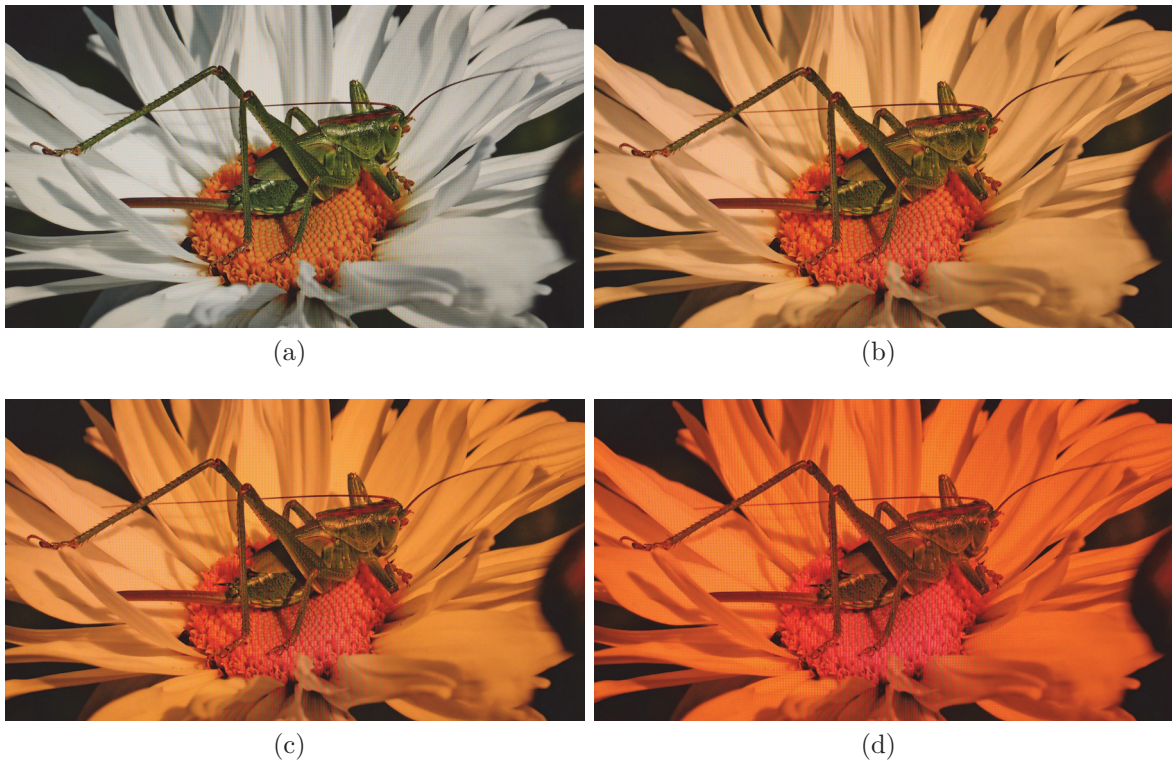


Abbildung 3.4: Einfluss der f.lux Software auf den Bildinhalt des Asus Monitors: f.lux 6 500 K (a); f.lux 3 400 K (b); f.lux 2 700 K (c) und f.lux 1 900 K (d)

3.3 Experiment 3: Nicht-visuelle Lichtwirkung von Displays in Büroumgebungen

Die im Stand der Forschung und Praxis in Kapitel 2.5.6 aufgezeigten Studien zur nicht-visuellen Lichtwirkung von Displays sind allesamt Laborstudien, die einzig die Wirkung des Displaylights untersuchen. Diese Laborstudien wurden in abgedunkelten Versuchsräumen ohne weitere Lichtquellen durchgeführt. Bei der Nutzung von Displays in Büroumgebungen sind aber üblicherweise weitere Lichtquellen vorhanden. Abbildung 3.5 zeigt einen Büroarbeitsplatz. Das am Auge auftreffende Licht setzt sich aus dem Tageslicht, der künstlichen Raumbelichtung und dem Displaylicht zusammen.

Bei der Nutzung von Displaysystemen in Bürosituationen stellen sich folgende Fragestellungen:

- Wie groß ist der Anteil der nicht-visuellen Lichtwirkung von Displays in täglichen Nutzungssituationen wie beispielsweise in Büroumgebungen?
- Ist bei der Reduzierung der nicht-visuellen Lichtwirkung von Displays bei gleichzeitigem Vorhandensein weiterer Lichtquellen ein physiologischer Effekt auf den Menschen zu erwarten?

Im folgenden Abschnitt werden messtechnisch die Fragestellungen beantwortet. Hierzu wird ein Experiment für die anteilige Messung der nicht-visuellen Wirkung von Tageslicht, Kunstlicht und Displaylicht auf den Menschen durchgeführt.

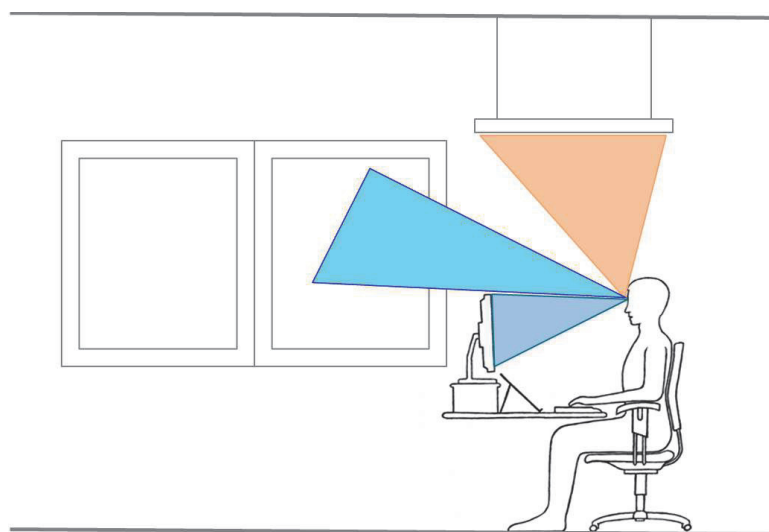


Abbildung 3.5: Darstellung der Lichtquellen in Büroumgebungen, die sich aus dem Displaylicht, dem Tageslicht und der Raumbelichtung zusammensetzt

Bildschirmdiagonale LCD	Sehabstand
15" / 330 mm	600 mm
17" / 432 mm	700 mm
19" / 483 mm	800 mm
22" / 559 mm	900 mm
>24" / 610 mm	1000 mm

Tabelle 3.8: Empfohlener Sehabstand für Bildschirmdiagonalen nach (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV 2015)

3.3.1 Methode und Versuchsaufbau

Zur quantitativen Bewertung der nicht-visuellen Lichtmessung von Displays wird die melanopisch bewertete Bestrahlungsstärke am Auge (MDEI) aus Kapitel 3.1 verwendet. Die Auswahl der Messorte soll verbreitete Büroformen und Arbeitsplatzsituationen widerspiegeln. Die Grundlage hierfür liefert die Umfrage „Wahrgenommene Lichtqualität im Büro“ mit 2148 Teilnehmer (Kelter 2014). Diese Umfrage enthält Informationen über die räumliche Anordnung von Büros, die Abstände und Positionen von Fenstern sowie die installierte Beleuchtung.

Die Messungen werden an 24 verschiedenen Arbeitsplatzsituationen durchgeführt. Gemessen wird die spektrale Beleuchtungsstärke vertikal in Augenhöhe. Daraus wird der MDEI berechnet. Anhang C.2 zeigt den Messaufbau mit dem Messgerät Gigahertz-Optik BTS256-LED (C.1.1). Die Position des Messgerätes wird in jeder Arbeitsplatzsituation individuell angepasst. Das Messgerät repräsentiert die Position der Augen des Nutzers. Der Abstand zum Display basiert auf den Empfehlungen der DGUV zur Überwachung des gesamten Bildinhaltes nach Tabelle 3.8 (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV 2015). Die Höhe der Messposition ergibt sich aus der anthropometrischen Arbeitsplatzgestaltung. Die Sehachse im Sitzen bei einer entspannten Kopf- und Augenhaltung beträgt ungefähr 35° bis 40° gegenüber der Waagrechten (Schmauder und Spanner-Ulmer 2014). Die Position der Augen / des Messgerätes wird ableitend daraus auf die Höhe der Oberkante des Displays gewählt. Der Messkopf des Messgerätes ist senkrecht auf die Oberkante des Displays ausgerichtet.

Zur differenzierten Betrachtung der Abhängigkeit der Displaygröße von der nicht-visuellen Lichtwirkung werden die 24 gemessenen Arbeitsplatzsituationen in drei Kategorien unterteilt:

- Kategorie 1 hat eine Displayfläche kleiner als 1600 cm^2 (<24" Diagonale). Zwölf Arbeitsplatzsituationen wurden in Kategorie 1 gemessen. Sechs Situationen an dunkleren Arbeitsplätzen mit einer durchschnittlichen horizontalen gesamten Beleuchtungsstärke auf

Tischhöhe von 390 lx. Sechs Situationen an helleren Arbeitsplätzen mit 618 lx auf Tischhöhe.

- Kategorie 2 hat eine Displayfläche zwischen 1600 cm² und 2300 cm² (20“ bis 24“ Monitor mit 15“ Laptop). Acht Situationen wurden in Kategorie 2 gemessen mit einer durchschnittlichen horizontalen gesamten Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe von 437 lx.
- Kategorie 3 hat eine Displayfläche größer als 2300 cm² (>27“ oder zwei 20“ bis 24“). Vier Situationen werden in dieser Situation gemessen mit einer durchschnittlichen horizontalen Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe von 590 lx.

In jeder Arbeitsplatzsituation werden fünf Messungen durchgeführt. Dadurch wird eine reproduzierbare Messmethode definiert, bei der die Gesamtbeleuchtung in die Anteile Tageslicht, Kunstlicht und Displaylicht zerlegt werden kann. Tabelle 3.9 beschreibt die Messszenarien.

Messung Nr.	Messposition (vertikal/horizontal)	Kunstlicht (AN/AUS)	Display (AN/AUS)
1	horizontal	AN	AN
2	vertikal	AN	AN
3	vertikal	AN	AUS
4	vertikal	AUS	AUS
5	vertikal	AUS	AN

Tabelle 3.9: Auflistung der Messszenarien: Messung Nr. 1 ist Referenzmessung der horizontalen Beleuchtungsstärke auf Tischhöhe nach DIN EN 12464-1

3.3.2 Ergebnisse der Messungen

Abbildung 3.6(a) zeigt die Ergebnisse der photopischen Messungen. Die Ergebnisse sind die jeweiligen Durchschnittswerte in den Kategorien. Der gestreifte Balken ist die durchschnittliche Gesamtbeleuchtungsstärke vertikal am Auge; Dunkelgrau ist der Anteil des Tageslichts, Grau der Anteil der künstlichen Raumbeleuchtung und Hellgrau der Anteil des Displaylichts. Abbildung 3.6(b) zeigt die aus den photopischen Messungen errechneten MDEI-Werte.

Tabelle 3.10 zeigt den prozentualen Anteil der Displaybeleuchtung an der gesamten vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge. Die Beleuchtungsstärke des Tageslichts variiert. Eine prozentuale Darstellung ist in diesem Fall abhängig vom Tageslicht. In den einzelnen Kategorien ist eine Abhängigkeit der Displaygröße und in Kategorie 1 eine Abhängigkeit der Umgebungsbeleuchtung zu erkennen. Aufgrund der hohen Farbtemperatur und des hohen Blauanteils in Displays

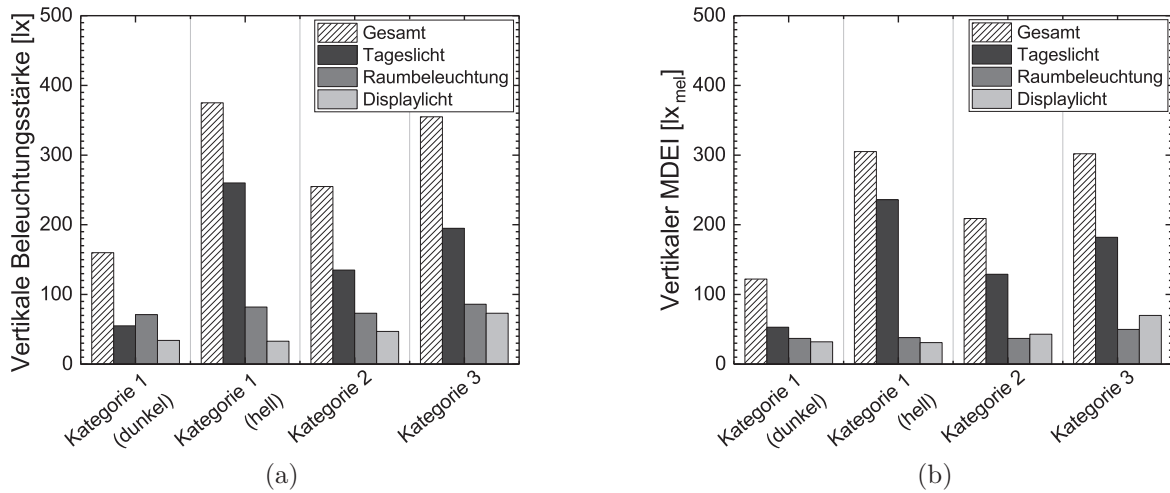


Abbildung 3.6: Ergebnisse der Messungen der durchschnittlichen vertikalen Beleuchtungsstärke (a) und die daraus berechneten MDEI-Werte (b) (Pross et al. 2017)

Kategorie	Anteil Displaylicht photopisch	Anteil Displaylicht melanopisch
1 (dunkel)	21 %	26 %
1 (hell)	09 %	10 %
2	18 %	21 %
3	21 %	23 %

Tabelle 3.10: Anteile der Displaybeleuchtung der am Auge auftreffenden Beleuchtungsstärke

ist die melanopisch bewertete Beleuchtungsstärke größer als die photopisch gemessene Beleuchtungsstärke.

Die vorab gezeigten Ergebnisse liefern keine Aussage über den Anteil der Displaybeleuchtung an Arbeitsplätzen ohne Tageslicht mit ausschließlich künstlicher Raumbelichtung. Zur Bewertung des maximalen Anteils der Displaybeleuchtung in Büroumgebungen wird eine weitere Messung durchgeführt. Diese Messung soll das Arbeiten ohne Tageslicht repräsentieren, mit der nach DIN EN 12464-1 geforderten vertikalen Beleuchtungsstärke von 500 lx auf Arbeitsplatzhöhe. Das Display ist ein heller großflächiger Monitor mit $27''$ Diagonale (Kategorie 2) und einer maximalen Leuchtdichte von 400 cd/m^2 (Model: Fujitsu PT27T-7 UHD). Die Lichtquelle des Umgebungslichts ist eine Leuchtstoffröhre mit einer Farbtemperatur von 4000 K (Model: 840/T8). Abbildung 3.7 zeigt die Spektren der gemessenen Bestrahlungsstärke am Auge. Die Ergebnisse der gemessenen Beleuchtungsstärken am Auge und der daraus berechneten MDEI sind in Tabelle 3.11 zu sehen. Vertikal auf Augenhöhe beträgt bei dieser Messung die photopische Beleuchtungsstärke des Displaylichts 35 %. Melanopisch bewertet sind dies 46 %.

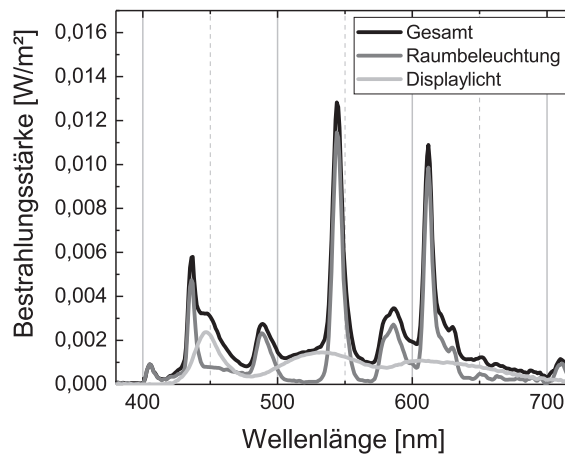


Abbildung 3.7: Spektrale Bestrahlungsstärke am Auge der gesamten Lichtquellen (Schwarz), der künstlichen Raumbeleuchtung (Dunkelgrau) und des Displaylichts (Hellgrau)

Anteil	Beleuchtungsstärke		MDEI	
	Wert	Anteil	Wert	Anteil
Gesamt	219 lx	100 %	138 lx _{mel}	100 %
Anteil Raumbeleuchtung	142 lx	65 %	74 lx _{mel}	54 %
Anteil Displaylicht	77 lx	35 %	64 lx _{mel}	46 %

Tabelle 3.11: Ergebnisse zur Bewertung des maximalen Einflusses von Displaylicht in Büroumgebungen

3.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die durchgeführten Messungen verdeutlichen die Zusammensetzung der am Auge ankommenden Beleuchtungsstärken mit deren Anteile von Tageslicht, künstlicher Raumbeleuchtung und Displaylicht. Bei Arbeitsplätzen in Fensternähe hat am Tag das Tageslicht den größten Anteil an der am Auge ankommenden Beleuchtungsstärke. Der Anteil des Displaylichts steigt mit der Größe und Helligkeit der verwendeten Displays (Pross et al. 2017).

Hervorzuheben ist der Anteil der Displaybeleuchtung am Abend und in der Nacht ohne den Einfluss von Tageslicht. An einem gemessenen Arbeitsplatz, der die von der DIN geforderten 500 lx horizontalen Beleuchtungsstärken erfüllt, beträgt der Anteil eines 400 cd/m² hellen 27“ Displays bis ca. 35 % der Gesamtbeleuchtungsstärke. Melanopisch bewertet liegt der Anteil des Displays bei etwa 46 %. Es ist davon auszugehen, dass bei größeren Displays oder einer höheren Anzahl von Displays der Anteil der melanopisch bewerteten Beleuchtungsstärken am Auge durch Displays den der künstlichen Beleuchtung übertrifft.

Die Ergebnisse des Anteils der Displaybeleuchtung an der gesamten Beleuchtungssituation in Innenräumen werden zum jetzigen Zeitpunkt weder in der Lichtplanung noch in Vorschriften und Normen zur Arbeitsplatzgestaltung berücksichtigt. Die Norm DIN EN 12464-1 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2011-08-01) beschreibt die Anforderungen an die Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen. Ein Fokus bei dieser Norm liegt auf der Beleuchtung von Bildschirmarbeitsplätzen. Das Licht des Displays wird dabei nicht berücksichtigt. Einzig die Norm DIN SPEC 67600 liefert einen Hinweis auf die Wirksamkeit von Displays. Dort steht in einer Anmerkung in Kapitel 6 „Planung spezieller Objekte“ Folgendes:

„ANMERKUNG 1 Biologische Lichtwirkungen werden nicht nur über Raumbeleuchtungen generiert, sondern bspw. auch von aktiven Lichtquellen, wie z. B. von Bildschirmen, Kontrollanzeigen. Je nach Ausführung und Nutzung können diese, z. B. am Abend, eine Störung des individuellen zirkadianen Rhythmus hervorrufen“ (Deutsches Institut für Normung e.V. 2013-04-01, S. 23)

3.4 Experiment 4: Schädigung durch blaues Licht von Displays

Die Hersteller von Computermonitoren verwenden für den reduzierten Blaulichtanteil in Displays (vgl. Kapitel 2.6.2) und dessen Wirkungsweise einen unterschiedlichen Terminus (ASUS 2015; BenQ 2013; SAMSUNG 2015; ViewSonic 2015). Folgende drei Wirkungsweisen von blauem Licht in Displays werden in diesen Quellen verwendet:

1. Blaulichtgefahr (Blue Light Hazard), eine Schädigung der Retina impliziert durch hochenergetische blaue Strahlung,
2. Reduzierung von blauem Licht zur Verringerung von Schlafstörungen,
3. Ermüdungsprozesse des Auges, wie z. B. das „Computer Vision Syndrom“ (CVS) (Blehm et al. 2005).

Der Schwerpunkt aller Hersteller ist die Blaulichtgefahr „Blue Light Hazard“. Fraglich ist, ob das Licht der Displays tatsächlich eine retinale Schädigung zur Folge hat. Der TÜV Rheinland vergibt für Bildschirme mit reduziertem Blaulicht ein Zertifikat (TÜV Rheinland 2015). Ziel dieser Zertifizierung ist der Nachweis, dass von diesen Displays keine Schädigung der Retina zu erwarten ist. Dabei ist nicht bewiesen, ob das Licht von Displays genug Energie ausstrahlt, um Schädigungen der Retina zu verursachen (vgl. Kapitel 2.6). Die Vermutung liegt nahe, dass Schädigungen von blauem Licht in Displays sich wahrscheinlicher auf eine Störung des zirkadianen Systems beziehen, als dass sie retinale Schädigungen hervorrufen (Pross et al. 2017).

3.4.1 Methode und Versuchsaufbau

Die Bewertung der Schädigung durch blaues Licht von Displays basiert auf der in Kapitel 2.6.2 beschriebenen Grenzwerte der Norm DIN EN 62471 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2009-03-01). Die Messung erfolgt mit einem Blaulicht-Optometer X1-3 von Gigahertz-Optik (C.1.2) mit einem 200 mm Vorsatz Tubus senkrecht zum Display. Die Messungen der spektralen Strahldichte wird mit einem Konica Minolta CS-2000A (C.1.3) Spektralradiometer durchgeführt. Zur Messung der maximalen Strahldichte des Displays wird ein weißes Testbild (R=255/G=255/B=255) verwendet.

Die Auswahl der Displays basiert auf der Repräsentation täglich genutzter Geräte. Es werden verschiedene Produktgruppen mit hellen Displays gewählt. Die Produktgruppen und Geräte sind:

- Zwei helle LED-Büromonitore mit 27“ Diagonale und einer „Low-Blue-Light“ Option (Fujitsu P27T-7 UHD und Asus MX27A)
- Zwei CCFL-basierte Monitore mit 24“ Diagonale (HP LP2475w) und 19“ Diagonale (EIZO FlexScanS1932)
- Drei Head-Mounted Displays (HTC Vive, Oculus Rift und Samsung Gear VR Note 4)
- Ein LED-Matrixdisplay für den Außenbereich (ICT inspireLED s8b)

Ziel der Messungen der ausgewählten Displays ist eine induktive Schlussfolgerung zur Blaulichtschädigung von Displaysystemen. Die Head-Mounted-Displays werden in diesem Experiment gemessen, da diese Geräte mit wenigen Zentimetern Abstand direkt vor dem Auge verwendet werden. Das untersuchte LED-Matrixdisplay verdeutlicht den Grenzwert aktueller Displaytechnik in Bezug auf maximale Helligkeit der Displayinhalte. Mit einer Leuchtdichte von $6\,200\text{ cd/m}^2$ ist es um den Faktor 15 heller als helle Büromonitore mit 400 cd/m^2 .

3.4.2 Ergebnisse der Messungen

Abbildung 3.8 zeigt die Ergebnisse der gemessenen Leuchtdichten sowie die berechnete Blaulichtgewichteten Strahldichten der Displaysysteme nach Gleichung 2.35. Die beiden 27“ LED Büromonitore mit einer Leuchtdichte von 400 cd/m^2 haben eine Blaulichtgewichtete Strahldichte von $0,31\text{ W/(m}^2\text{sr)}$. Bei Aktivierung der „Low-Blue-Light“ Option des P27T-7 UHD, verringert sich die Blaulichtgewichtete Strahldichte auf $0,23\text{ W/(m}^2\text{sr)}$, die Leuchtdichte verringert sich auf 350 cd/m^2 . Das Model MX27A bietet mehrere Stufen der „Low-Blue-Light“ Option. In Stufe 3 ist die Blaulichtgewichtete Strahldichte $0,22\text{ W/(m}^2\text{sr)}$ bei einer Leuchtdichte von 365 cd/m^2 . In Stufe 4 ist die Blaulichtgewichtete Strahldichte $0,088\text{ W/(m}^2\text{sr)}$ bei einer Leuchtdichte von 156 cd/m^2 . Am Beispiel dieser beiden Displays kann die geringe Schädigung durch blaues Licht von Displays aufgezeigt werden. In der Standardeinstellung der Displays bei maximaler Helligkeit ist deren Blaulichtgewichtete Strahldichte um den Faktor 300 unterhalb des Grenzwertes der freien Gruppe von $100\text{ W/(m}^2\text{sr)}$. Die maximale Bestrahlungsdauer dieser Displays würde nach Formel 2.36 nach ca. 38 Tagen Dauernutzung erreicht werden.

Die beiden Büromonitore mit CCFL Beleuchtung haben durch den geringeren Blaulichtanteil in der Lichtquelle eine Blaulichtgewichtete Strahldichte unter $0,2\text{ W/(m}^2\text{sr)}$. Die drei Head-Mounted Displays besitzen eine Blaulichtgewichtete Strahldichte zwischen $0,06\text{ W/(m}^2\text{sr)}$ und $0,27\text{ W/(m}^2\text{sr)}$. Das LED-Matrixdisplay zeigt den höchsten Messwert mit einer Leuchtdichte von $6\,200\text{ cd/m}^2$ für ein weißes Bild. Die Blaulichtgewichtete Strahldichte beträgt $8,48\text{ W/(m}^2\text{sr)}$, was etwa $1/12$ unter der Grenze der Risikogruppe 0 ist.

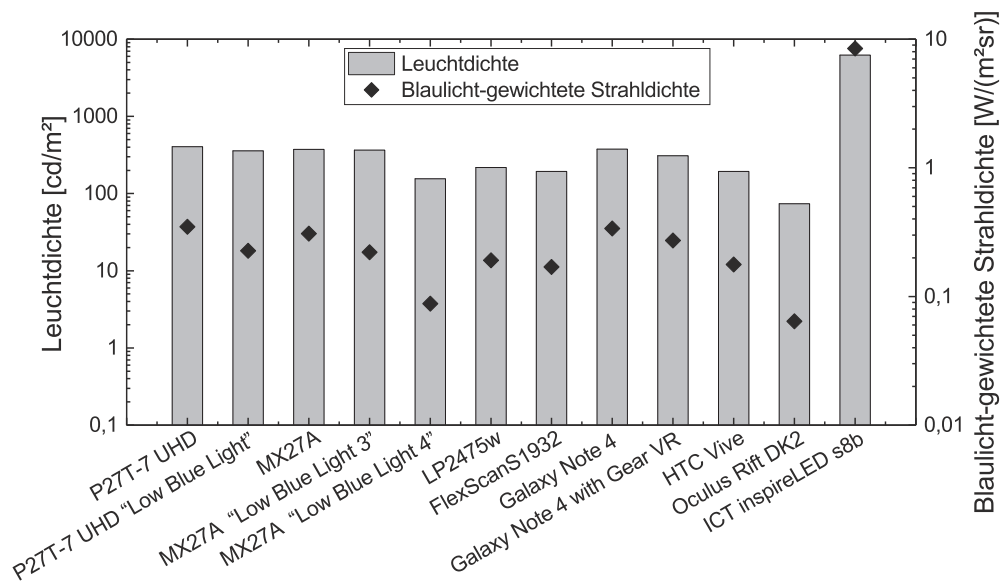


Abbildung 3.8: Ergebnisse der Leuchtdichtemessungen und Blaulicht-gewichteten Strahlungsmessungen in halblogarithmischer Darstellung (Pross et al. 2017)

3.4.3 Diskussion der Ergebnisse

Wird das emittierte Licht von Displays nach bekannten Standards hinsichtlich seiner Schädigung durch blaues Licht bewertet, kann nach heutigem Kenntnisstand die Wahrscheinlichkeit von photochemischen Schäden als gering eingestuft werden. Vergleichend zur Arbeit von Behar-Cohen et al. (Behar-Cohen et al. 2011), die weiße LEDs mit einer Leuchtdichte von bis zu $1,61 \cdot 10^7 \text{ cd/m}^2$ bei einem Lichtstrom von 100 lm noch in die Risikogruppe 0 eingestuft haben, ist die Leuchtdichte von Displays um den Faktor 40 000 geringer. Die Blaulicht-gewichtete Strahlendichte der vermessenen Displays ist etwa um den Faktor 300 kleiner als der Grenzwert der Risikogruppe 0.

Bei Displaysystemen ist bezüglich der ausgestrahlten Energie der geringste Anteil an Blaulicht-induzierten Schäden im Vergleich zu anderen Lichtquellen zu erwarten. Das Licht der Allgemeinbeleuchtung und vor allem des Tageslichts besitzen eine vielfach höhere Energie als Displays. Angesichts dieser Ergebnisse liegt die Schlussfolgerung nahe: Die Motivation, die Menge an blauem Licht in Displays zu reduzieren, sollte vorzugsweise dazu verwendet werden, um den Tag-Nacht-Rhythmus zu unterstützen, weniger um photochemische Augenschäden zu vermeiden.

3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vier Experimente können wie folgt zusammengefasst werden:

Aufgrund der nicht-visuellen Bewertung in Experiment 1 wird in dieser Arbeit die nicht-visuelle Bewertungsmethode nach DIN SPEC 5031-100 und die Angabe der Anregung der einzelnen Photorezeptoren verwendet. Dies bestätigt die zum jetzigen Zeitpunkt von der CIE vorgeschlagene und in eine ISO Norm überführte Methode (CIE 2015; ISO 2018). Da der MSI ebenfalls hinreichend genaue Ergebnisse liefert und die zugrundeliegende Bewertungsmethode dem der DIN SPEC 5031-100 entspricht, wird diese Methode nicht weiterverwendet. Zur Berechnung der Einheiten der nicht-visuellen Lichtwirkung wird die Excel-basierte „Human Centric Lighting Toolbox V14.21¹ von D. Lang verwendet (Lang 2016). Tabelle 3.12 listet die Bezeichnungen und Einheiten der Einzelbetrachtung der Photorezeptoren auf (CIE 2015). Aus der DIN SPEC 5031-10:2015-08 werden folgende melanopisch bewerteten Strahlungsgrößen verwendet (Deutsches Institut für Normung e.V. 2015-08-01):

- Melanopische tageslicht-äquivalente Beleuchtungsstärke $\mathbf{E}_{v,mel,D65}$ (MDEI)
- Melanopischer Wirkungsfaktor $\mathbf{a}_{mel,v}$

Photorezeptor	Photopigment (Name, α)	Spektrale Effizienz $s_\alpha(\lambda)$	Menge (α -opic irradiance)	Menge Symbol $E_{e,\alpha}$	Einheit
S-Zapfen	photopsin (sc)	cyanolabe	cyanopic	$E_{e,sc}$	W/m^2
M-Zapfen	photopsin (mc)	cloroabe	cloropic	$E_{e,mc}$	W/m^2
L-Zapfen	photopsin (lc)	erythrolabe	erythropic	$E_{e,lc}$	W/m^2
ipRGC	melanopsin (z)	melanopic	melanopic	$E_{e,z}$	W/m^2
Stäbchen	rhodopsin (r)	rhodopic	rhodopic	$E_{e,r}$	W/m^2

Tabelle 3.12: CIE empfohlene SI-konforme Bezeichnungen der Photorezeptoren nach CIE TN 003:2015 (CIE 2015)

Diese Arbeit zeigt, welche nicht-visuellen Bewertungsmethoden in der durchgeführten Studie die genauesten Vorhersagen zur Wirkung des Lichts auf den Menschen liefern. Für eine detailliertere Beschreibung einer allgemeingültigen nicht-visuellen Bewertungsmethode für Displays

¹Die HCL Toolbox entstand im Zuge des EU Forschungsprojekts „SSL-erate“ (Project ID: 619249 / FP7-ICT) (https://cordis.europa.eu/project/rcn/111203_en.html).

ist es notwendig, weitere Experimente durchzuführen. Aus der bereits veröffentlichten Literatur lässt sich nur teilweise ein mathematischer Zusammenhang zwischen Melatoninsuppression und Lichtspektrum von Displays ableiten. Zur Erstellung einer Metaanalyse aus der Literatur sind detailliertere Ergebnisse notwendig. Idealerweise wird die spektrale photopische Beleuchtungsstärke am Auge benötigt, um daraus die nicht-visuellen Effekte zu berechnen. Viele Arbeiten erfüllen diese Anforderungen nicht.

Die Messergebnisse der Displaysysteme in Experiment 2 zur Reduzierung des Blaulichtanteils in handelsüblichen Displays zeigen eine Streuung über die gemessenen Modelle. Die in den beiden untersuchten Büromonitoren integrierte Blaulichtreduktion verändert den dargebotenen Farbraum geringfügig. Einzig der Weißpunkt wird hin zu einer wärmeren Lichtfarbe verschoben. Die Verringerung der nicht-visuellen Lichtwirkung ist auf die Verringerung der Gesamthelligkeit zurückzuführen. Dies verdeutlicht sich in den Werten des $a_{mel,v}$, der dabei um maximal 14,6 % geringer ist.

Die f.lux Software verringert den $a_{mel,v}$ in der Stufe f.lux 3400 K zwischen 33 % bis 37 %. In der Stufe f.lux 2700 K zwischen 47 % und 53 %. Die Farbraumveränderung ist bei kleiner 2 %. Die Methode des Tablet-Computers iPad zeigt eine ähnliche Reduzierung des $a_{mel,v}$ und des MDEI, bei deutlich größerer Verringerung des Farbraumes, da bei der Methode der Verringerung sowohl der Blauanteil als auch der Grünanteil reduziert wird.

Zusammenfassend kann aufgezeigt werden, dass durch die Reduzierung des Blaulichtanteils eine Reduktion der nicht-visuellen Lichtwirkung um bis zu 75 % möglich ist. Dies setzt sich zusammen aus einer Reduktion des Wirkungsfaktors $a_{mel,v}$ um etwa 50 % und der Reduktion der Beleuchtungsstärke um etwa 50 %. Die Folge daraus ist eine deutlich wahrnehmbare Verschiebung des Weißpunktes in Richtung einer warmen Lichtfarbe. Nagare et al. konnten aufzeigen, dass zwischen dem „Night Shift Modus“ und der Standardeinstellung kein signifikanter Unterschied in der Melatoninsuppression gefunden werden konnte. Die Autoren folgern: Eine Reduzierung des Blaulichtanteils ist nur in Kombination mit einer Helligkeitsreduktion ausreichend, um hinreichende Auswirkungen auf das zirkadiane System zu haben (Nagare et al. 2018).

Experiment 3 zeigt, dass die zunehmende Menge an Displaylicht am Arbeitsplatz, bedingt durch eine steigende Anzahl, Größe und Helligkeit von Displays, die Gesamtbeleuchtungsstärke am Auge messbar erhöht. Insbesondere in den Abendstunden und in der Nacht ist die Menge der melanopisch wirksamen Beleuchtungsstärke der Displays hoch, da die Umgebungsbeleuchtung oft weniger blaues Licht als das Displaylicht enthält (Pross et al. 2017).

Aus der dargelegten Bewertung von Displaysystemen hinsichtlich der Schädigungen durch blaues Licht in Experiment 4, kann folgende Aussage anhand bekannter Normen und Grenzwerte getroffen werden: Nach heutigem Kenntnisstand kann das Risiko von Licht von Displaysystemen hinsichtlich der Blaulichtschädigung aufgrund der geringen Leuchtdichte als geringer eingestuft werden als die Allgemeinbeleuchtung oder das Tageslicht. Folglich wird die Schädigung durch blaues Licht in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Die Ergebnisse der vier durchgeführten Experimente führen hinsichtlich der am Anfang dieses Kapitels gestellten Forschungsfragen folgende Erkenntnis: Die abendliche Reduzierung der Blaulichtanteile in Displays unterstützen den menschlichen Tag-Nacht-Rhythmus. Die Folge dieser Reduzierung ist eine messbare Verschiebung des Weißpunktes hin zu wärmeren (orange-nen) Lichtfarben. Wie diese Verschiebung des Weißpunktes von den Nutzern wahrgenommen und akzeptiert wird, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht bekannt.

Ausgehend von der spektralen Wirkungsfunktion der Melatoninsuppression aus Kapitel 2.5.5 ist davon auszugehen, dass eine spektrale Verschiebung der Peak-Wellenlänge einen ähnlichen Einfluss auf die nicht-visuelle Lichtwirkung besitzt wie die Blaulichtreduzierung; dies jedoch bei identischen Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken. Wie sich eine Verschiebung der Peak-Wellenlänge auf die nicht-visuelle-Lichtwirkung und den dargestellten Farbraum und Weißpunkt auswirkt, gilt es zu untersuchen. Darüber hinaus stellt sich die Frage des direkten Vergleichs der Wahrnehmung und Akzeptanz sowie der nicht-visuellen Bewertung der Methode der Blaulichtreduktion zur Verschiebung der Peak-Wellenlänge der Primärfarben.

4 Lösungsansatz und Methodenentwicklung

In der bisherigen Forschung der nicht-visuellen Lichtwirkung von Displays wurden die Auswirkungen auf die subjektive Wahrnehmung der Nutzer nicht ausreichend bearbeitet. Dieses Kapitel beschreibt den Lösungsansatz und die Entwicklung einer Methode zur Beleuchtung von Displaysystemen, die das menschliche zirkadiane System unterstützen und deren spektrale Veränderung jedoch von den Nutzern möglichst nicht wahrgenommen wird. Aus den Defiziten des Stands der Forschung und Praxis sowie den Ergebnissen der Experimente in Kapitel 3 ergibt sich die Notwendigkeit einer spektralen Verschiebung der Peak-Wellenlängen zur Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems.

Die Beleuchtungsmethode basiert auf dem Konzept des zirkadian wirksamen Displays (CwD) erstmals 2009 im Patent WO 2010/072415 A1 vorgestellt (Bues et al. 2010). Der Ansatz dieses Patentbesitzes liegt in der Zusammensetzung einer Displayhinterleuchtung oder eines selbstleuchtenden Displays auf Basis mehrerer spektral unterschiedlicher Lichtquellen. Die Lichtquellen werden nach einem vordefinierten Zeitintervall angehoben oder herabgesetzt, um zwei metamere Lichtspektren zu erzeugen, die variabel zueinander verändert werden können. Der Verwendungszweck des Displaysystems ist die tageszeitabhängige Förderung oder Reduktion der Melatoninproduktion. Abbildung 4.1 zeigt das 2009 patentierte Konzept des CwD.

Stefani et al. beschreiben das Konzept des CwD 2010 folgendermaßen: Abhängig von der Person, der Konzentration, Müdigkeit und Wachsamkeit soll die zirkadiane Wirksamkeit innerhalb bestimmter Grenzen steuerbar sein. Für die technische Umsetzung wird eine LED-basierte Hintergrundbeleuchtung benötigt, die aus zwei separat ansteuerbaren blauen (420 nm und 463 nm) LEDs zusätzlich zur grünen und roten LED besteht (Stefani et al. 2010b).

4.1 Anforderungen an die Methode und Lösungsansatz

Aus den nicht-visuellen Bewertungsmethoden in Kapitel 2.5.5 lässt sich ableiten: Nicht nur der blaue Anteil, sondern auch der grüne Anteil im Lichtspektrum ist für die nicht-visuelle Wirkung von Bedeutung. Nach der DIN SPEC 5031-100 liegt der Maximalwert der melanopischen Empfindlichkeitskurve bei 490 nm (Deutsches Institut für Normung e.V. 2015-08-01). Die primäre

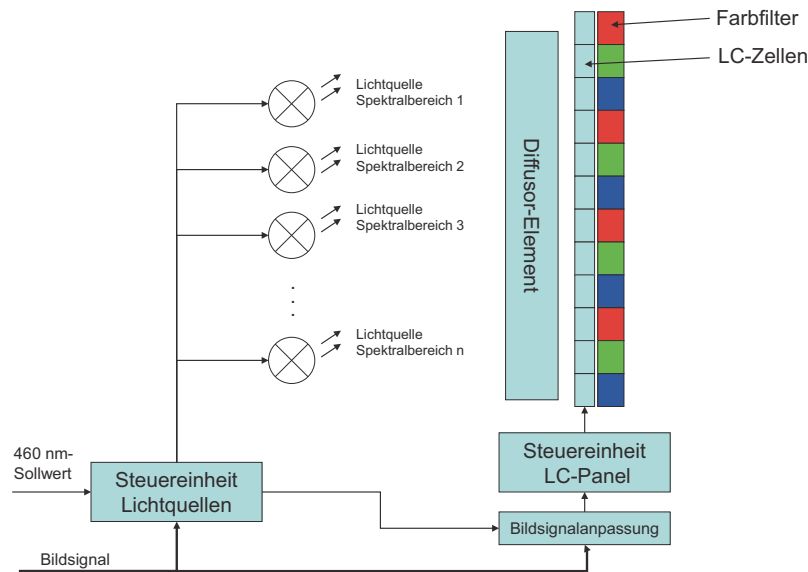


Abbildung 4.1: Abbildung des patentierten Konzeptes eines zirkadian wirksamen Displays aus Bues et al. (Bues et al. 2010)

Funktion der Beleuchtungsmethode bzw. der Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems ist der Schutz der nächtlichen Melatoninproduktion (s. Kapitel 2.5).

Experiment 1 in Kapitel 3.1 zeigt einen melanopischen Wirkungsfaktor der IAO-UPK-Studie von $a_{mel,v} = 0,898$ bei einer Farbtemperatur von $T_f = 6653 K$ für das LED-Display mit einem hohen Blauanteil. Dies entspricht etwa dem melanopischen Wirkungsfaktor von Tageslicht ($a_{mel,v} = 0,906$). Das CCFL-Display mit reduziertem Blauanteil hat einen melanopischen Wirkungsfaktor $a_{mel,v} = 0,761$ bei einer Farbtemperatur von $T_f = 4775 K$. Dies entspricht dem melanopischen Wirkungsfaktor des Sonnenlichts ($a_{mel,v} = 0,761$) oder ungefähr dem der Lichtart D50 ($a_{mel,v} = 0,768$) nach Tabelle 2.3. Mit einer Beleuchtungsstärke am Auge von $E_v = 110 lx$ zeigt das Ergebnis des LED-Displays bei sieben von acht signifikanten Messzeitpunkten eine um 34,5% bis 15,7% höhere Melatoninunterdrückung als bei dem CCFL-Display (Cajochen et al. 2011).

In der Literatur (vgl. Kapitel 2.5.6) ist eine signifikante Melatoninunterdrückung in Display-Systemen mit Diagonalen ab 20“ und einer Beleuchtungsstärke von mindestens 100 lx am Auge zu erreichen (Cajochen et al. 2011; Sroykham und Wongsawat 2013). Der Einfluss geringerer Beleuchtungsstärken am Auge auf die Melatoninkonzentration, beispielsweise durch das Licht von Tablet-Displays, wird von Heath et al. als klinisch geringfügig eingestuft (Heath et al. 2014).

Im Patent WO 2010/072415 A1 wird eine variable Veränderung des Blauanteils vorgeschlagen (Bues et al. 2010). Dies bedeutet, dass die nicht-visuelle Lichtwirkung variabel zwischen

einem minimalen und maximalen Wert eingestellt werden soll. Eine variable Veränderung der nicht-visuellen Lichtwirkung ergibt folgende Schwierigkeit: Der Stand der Forschung und Praxis legt die Vermutung nahe, dass geringfügige Veränderungen der nicht-visuellen Lichtwirkung physiologisch nicht nachweisbar sind. Dies begründet sich aus den teilweise nicht signifikanten Ergebnissen bei den Untersuchungen Blaulicht-reduzierter Displays mit Beleuchtungsstärken am Auge unter 100 lx (Figueiro et al. 2013; Jones et al. 2018; Nagare et al. 2018; Rångtjell et al. 2016). Durch den Einfluss der Lichthistorie, wenn beispielsweise tagsüber der Mensch einer hohen Beleuchtungsstärke ausgesetzt ist, reduziert sich darüber hinaus der nächtliche Einfluss der Beleuchtung auf die nicht-visuelle Lichtwirkung (Hébert et al. 2002).

Zur Entwicklung der Beleuchtungsmethode wird folglich auf eine variable Veränderung der nicht-visuellen Lichtwirkung verzichtet. Die Beleuchtungsmethode basiert auf einem maximal und einem minimal wirksamen Lichtspektrum. Die Anforderungen an das maximal wirksame Lichtspektrum, in dieser Arbeit als **Tagmodus** bezeichnet, ist ein großer $a_{mel,v}$, dies bedeutet, dass der melanopische Wirkungsfaktor dem des Tageslichts entspricht oder größer ist. Für das minimal wirksame Lichtspektrum, den **Nachtmodus**, wird ein möglichst kleiner $a_{mel,v}$ benötigt.

Der Lösungsansatz zur Realisierung der Beleuchtungsmethode ist die Auswahl geeigneter Primärfarben zur Hinterleuchtung des Displaysystems. Es werden zwei RGB-Primärfarbenkombinationen benötigt, die anhand des spektralen Wirkungsspektrums der melanopischen Lichtwirkung $s_{mel}(\lambda)$ ausgewählt werden; erstens eine RGB-Kombination, in der der Blau- und Grünbereich möglichst innerhalb $s_{mel}(\lambda)$ liegt; zweitens eine RGB-Kombination, bei der die Peak-Wellenlängen möglichst außerhalb $s_{mel}(\lambda)$ liegen. Für die Auswahl der Primärfarben gilt als Randbedingung, dass der aufgespannte Farbumfang im Farbraum groß sein soll. Das minimal wirksame Lichtspektrum für die Nacht weist dadurch eine vergrößerte Lücke zwischen Blau und Grün auf. Durch sehr kurzwelliges blaues Licht von 420 nm ist die nächtliche subjektive Aktivierung am größten, der Einfluss auf die Melatoninkonzentration ist jedoch geringer als bei 490 nm (Cajochen 2007).

Die grundlegende Problematik bei der Verwendung zweier RGB-Kombinationen, die sich spektral unterscheiden, sind zwei resultierende Farbräume, die sich nicht vollständig überlagern. Je weiter die Peak-Wellenlängen beispielsweise bei der blauen Primärfarbe auseinanderliegen, desto kleiner wird der sich überlagernde, resultierende Farbraum. Es muss folglich aufgezeigt werden, ob der resultierende Farbraum für die Darstellung farbiger Bildinhalte ausreichend ist.

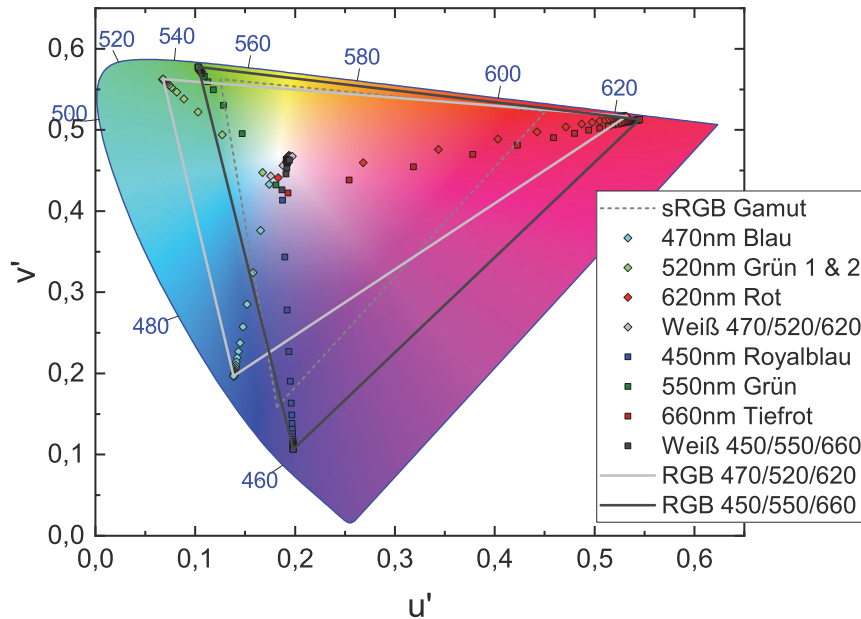


Abbildung 4.2: Farbräume der Displaycharakterisierung

Farbraum bei variablem Lichtspektrum

Die Verwendung unterschiedlicher blauer, grüner und roter Primärfarben als RGB-Kombination haben unterschiedliche Farbräume zur Folge. Um dies zu verdeutlichen wird in Abbildung 4.2 der Farbraum zweier RGB-Kombinationen dargestellt. Im folgenden Abschnitt wird die Fragestellung diskutiert: Kann ein Displaysystem hinreichend viele Farbräume als Metamere darstellen, wenn zwischen zwei RGB-Kombinationen mit unterschiedlichen Peak-Wellenlängen gewechselt wird?

Das folgende Beispiel nimmt die Auswahl der Primärfarben aus Kapitel 4.3 vorweg. Die erste RGB-Kombination (RGB 470/520/620) umfasst das Lichtspektrum des Tagmodus, basierend auf den Primärfarben 470 nm, 520 nm und 620 nm. Die zweite RGB-Kombination (RGB 450/550/660) basiert auf den Primärfarben 450 nm, 550 nm und 660 nm und ist das Lichtspektrum des Nachtmodus. Abbildung 4.2 zeigt die Farbräume der Displaycharakterisierung nach DIN EN 61966-4 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2000-12-01). Die digitalen Eingangsdaten D_R , D_G und D_B werden mit $N = 10$ Bit zwischen 0 und 1023 in einer Abstufung von 32 auf dem Display angezeigt und gemessen. Abbildung 4.3 zeigt den Zusammenhang der digitalen Eingangsdaten und der Helligkeit; 4.3(a) stellt die Strahldichte und 4.3(b) die wahrgenommene Leuchtdichte dar.

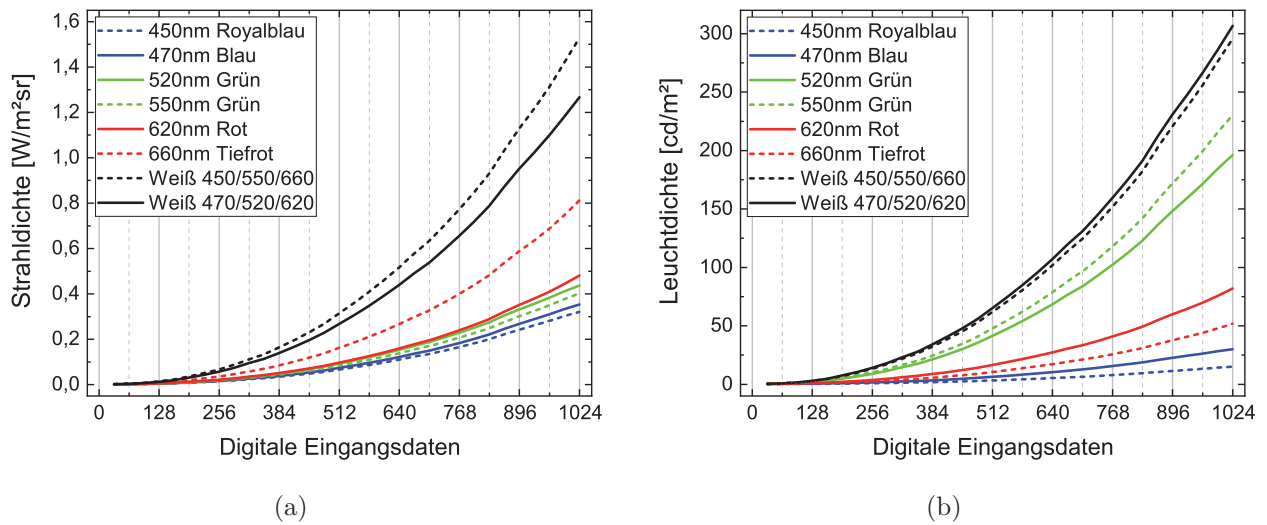


Abbildung 4.3: Charakterisierung der Primärfarben: Digitale Bilddaten über der Strahl- (a) und Leuchtdichte (b)

Besonders im Grün- und Blaubereich wird die Problematik der spektralen Veränderung deutlich. Die Darstellung einer gesättigten Primärfarbe auf dem Displaypanel ist über einen weiten Bereich der Bilddaten farbortstabil. Dies soll am Beispiel des 470 nm Blau in Abbildung 4.2 verdeutlicht werden: Ausgehend vom Weißpunkt des Farbraumes ist der dritte Messwert des 470 nm Blau an der Begrenzung des RGB 450/550/660 Farbdreiecks. Das digitale Eingangssignal ist $D_{B,470} \approx 96$. Daraus folgend sind 96 der 1024 digitalen Eingangsdaten im selben Farbraum. Dies sind digital weniger als 7 Bit der 10 Bit Abstufung. Umgerechnet auf ein LCP mit maximal 8 Bit Stufen entspricht dies einem Wert von 24 der 256 möglichen Stufen. Die Helligkeit dieses Wertes des Eingangssignals ist nach Abbildung 4.3 im Bereich des Schwarzwertes. Für die weiteren blauen und grünen Primärfarben trifft dies in ähnlicher Weise zu. Ein Maximalwert bei 550 nm Grün ist $D_{G,550} \approx 160$. Die Leuchtdichte ist unter 10% der maximalen Leuchtdichte. Im Rotbereich liegen die beiden Farbräume näher zusammen. 660 nm Tiefrot ist bei $D_{R,660} \approx 352$ an der Grenze des Farbraumes und 620 nm . Rot ist bei $D_{R,620} \approx 608$ an der Grenze des Farbraumes.

Der Zusammenhang zwischen den digitalen Eingangsdaten des Displays und der Helligkeit eines Bildpunktes wird als Gamma bezeichnet. Eine Anpassung der Gammakorrektur (vgl. Kapitel 2.4.2) hat eine Anpassung der wahrgenommenen Helligkeit zur Folge. Eine Erhöhung der Anzahl an gemeinsamen Farborten ist dadurch nur bedingt möglich. Wird der Gamma-Wert kleiner, beispielsweise $\gamma = 1$, ist der Zusammenhang zwischen den digitalen Eingangsdaten und der Helligkeit linear. Die Kurven in Abbildung 4.3 würden daher schneller ansteigen. Folglich wären weniger Farborte innerhalb des gemeinsamen Farbraumes, da mit heller werdenden Bildpunkten der Farbort sich an den Wert der Peak-Wellenlänge annähert.

In Abbildung 4.2 sind die Schnittpunkte der Gamut-Flächen der beiden RGB-Kombinationen: $u' = 0,527$ und $v' = 0,517$ für Rot; $u' = 0,111$ und $v' = 0,559$ für Grün; $u' = 0,177$ und $v' = 0,226$ für Blau zu sehen. Die Gamut-Fläche nach 2.22 beträgt $A = 34,81\%$ des gesamten Farbraumes. Die Fläche des sRGB-Gamut ist $A = 33,13\%$. Obwohl die resultierende Fläche des gemeinsamen Farbraumes größer ist als der sRGB-Gamut, sind die Unterschiede der Positionierungen der beiden Flächen in Abbildung 4.2 zu erkennen. In den roten Farbtönen deckt der resultierende Gamut mehr Farborte ab als in sRGB definiert sind; ebenso in den grünen Farbtönen. In den blauen Farbtönen ist der Schnittpunkt der beiden RGB-Kombinationen näher am Weißpunkt als der blaue Eckpunkt des sRGB-Gamuts. Der Abstand des gemeinsamen Gamuts zum blauen Rand des Farbraumes ist groß. Gesättigtes Blau kann im gemeinsamen Farbraum somit nicht dargestellt werden.

Zusammenfassend kann aufgezeigt werden: Mit den gewählten Primärfarben ist es nicht möglich, ausreichend viele Farborte innerhalb der überlagerten Gamut-Flächen darzustellen. Bei gesättigtem Blau und Grün sind etwa 10% bis 15% der digitalen Eingangsdaten im selben Farbraum und in der Helligkeit bei unter 10% der Gesamthelligkeit. Obwohl im dargestellten Beispiel ein 10 Bit LCP mit 1024 Stufen verwendet wird, kann die resultierende Gamut-Fläche der Überlagerung nicht mit den üblichen 8 Bit Farben erreicht werden.

4.2 Methode zur Displaybeleuchtung

Die Anforderungen an die Beleuchtungsmethode lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zur Realisierung eines Displaysystems zur Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems werden zwei unterschiedliche Lichtspektren benötigt:
 - Ein maximal wirksames Lichtspektrum, der **Tagmodus**. Dabei entspricht die nicht-visuelle Lichtwirkung, repräsentiert durch den melanopische Wirkungsfaktor, dem des Tageslichts oder ist größer.
 - Ein minimal wirksames Lichtspektrum, der **Nachtmodus**. Dabei ist die nicht-visuelle Lichtwirkung und der melanopische Wirkungsfaktor möglichst klein. Eine Aktivierung in der Nacht sollte vermieden werden.
- Die Weißpunkte des Tagmodus und des Nachtmodus sollen möglichst am selben Farbort liegen und metamer sein.

- Der Nutzer sollte möglichst keinen visuellen Unterschied zwischen dem Tagmodus und dem Nachtmodus wahrnehmen.

In Kapitel 4.1 wurde gezeigt, dass bei spektraler Veränderung der Displayhintergrundbeleuchtung der resultierende gemeinsame Gamut zweier unterschiedlicher RGB-Kombinationen mit den gewählten Primärfarben im Blau- und Grünbereich etwa ein Zehntel der Eingangsdaten abgedeckt werden kann. Vor allem im Blaubereich überlagern sich gesättigte Farben nicht. Zwischen dem Tag- und Nachtmodus können Farben ausschließlich im resultierenden Gamut metamer dargestellt werden.

Nach Schanda ist ein Wert der Farberinnerung mit einem Farbunterschied bis zu $\Delta E_{ab} = 5$ bei einem Zeitunterschied von 15 Sekunden zu erwarten (Schanda 2007). Die Methode der Displaybeleuchtung besteht aus einem Tag- und einem Nachtmodus. Dabei wird die Annahme getroffen, dass zwischen den beiden Nutzungsmodi ein zeitlicher Abstand ist. Aufgrund des Farbabstandes der Farberinnerung wird für die Beleuchtungsmethode ein größeres ΔE angenommen. Es wird die Hypothese aufgestellt: Durch den zeitlichen Abstand zwischen dem Tag- und dem Nachtmodus, ist bis zu einem $\Delta E_{ab} \approx 5$ vom Nutzer nicht wahrnehmbar. Folglich wird keine exakt metamere Farbumrechnung für die gesättigten Farben benötigt. Der Weißpunkt der beiden Modi soll metamer sein.

Die Methode der Displaybeleuchtung basiert folglich auf der metameren Umrechnung des Weißpunktes. Die Methode wird daraus ableitend als **Methode des metameren Weißpunktes** bezeichnet. Der Übergang bzw. Wechsel zwischen dem Tag- und dem Nachtmodus wird in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Methode der Farbumrechnung

Die Farborte, die innerhalb des gemeinsamen Gamuts liegen, können folgendermaßen zwischen den beiden RGB-Kombinationen umgerechnet werden: Bei der Charakterisierung von Display-Systemen ergibt sich ein Zusammenhang zwischen den digitalen Eingangsdaten des Displays und des Tristimulus-Wertes nach Gleichung 2.16. Um einen metameren Farbort zu berechnen, werden diese Zusammenhänge der Charakterisierung der beiden RGB-Kombinationen nach Gleichung 4.1 gleichgesetzt.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1 \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_2 \cdot \begin{bmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Die Matrizen \mathbf{A}_1 und \mathbf{A}_2 werden nach der Messmethode der DIN EN 61966-4 bestimmt (Deutsches Institut für Normung e.V. 2000-12-01). Durch Umformung der Gleichung 4.1 kann folglich eine RGB-Kombination aus der anderen RGB-Kombination berechnet werden. Die Umrechnung der RGB-Werte erfolgt nach Gleichung 4.2. In dieser Gleichung wird der Gamma-Wert mit berücksichtigt.

$$\begin{bmatrix} R_2^{1/\gamma} \\ G_2^{1/\gamma} \\ B_2^{1/\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_2^{-1} \cdot \mathbf{A}_1 \cdot \begin{bmatrix} R_1^\gamma \\ G_1^\gamma \\ B_1^\gamma \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

4.3 Realisierung des Displayprototyps

Im folgenden Abschnitt wird die prototypische Realisierung der Methode des metameren Weißpunktes aufgezeigt.

Die Hintergrundbeleuchtung eines LCD verbraucht etwa 90 % der gesamten Energie eines Displays (Lee 2009). Bei einem 32 Zoll Monitor sollte die Leistungsaufnahme deutlich unter 150 W liegen. Ein typischer LED-Monitor sollte heller als 200 cd/m^2 sein, die Gleichmäßigkeit der LED-Hintergrundbeleuchtung größer 85 % und der ideale Weißpunkt bei $u' = 0,21$ und $v' = 0,471$ ($x = 0,33$; $y = 0,33$), was nahe am D65 Weißpunkt ist (Zeiler und Hüttner 2009). Displays sollten allgemein einen großen Farbraum, hohe Auflösung, hohen Kontrast (Schwarz-Weiß >300:1) und keine visuellen Defekte (Boyd 2016a) besitzen.

4.3.1 Auswahl der technischen Komponenten

Die Realisierung der Hintergrundbeleuchtung des CwD orientiert sich am technischen Aufbau von Harbers und Hoelen, West et al., Ziemann et al., Sugiura et al., sowie Zeiler und Hüttner (Harbers und Hoelen 2001; Sugiura 2009; Sugiura et al. 2006; West et al. 2003; Zeiler und Hüttner 2009; Ziemann, O., Poisel, H., Bloos, M., Kramer, G. 2008). Die Autoren verwenden LEDs mit etwa 1 W Leistung und ordnen diese flächig in einem Array hinter dem LCP an. Der Lichtverlust eines Direct Backlights ist am geringsten (Zeiler und Hüttner 2009). Da aufgrund der menschlichen Farbwahrnehmung viel Grün benötigt wird (vgl. Kapitel 2.2), ist ein Cluster von RGGB sinnvoll (Zeiler und Hüttner 2009). Die Verwendung mehrerer Primärfarben basiert auf der Grundlage von „Multi-Primary Displays“ (MPD) (vgl. Kapitel 2.4.5), wobei jedoch für die verwendeten Lichtspektren jeweils nur eine RGB-Kombination aktiv ist.

Name LED	Herstellerbezeichnung	Lichtstrom [lm] oder Strahlungsfluss [mW]	Farbort	
			u'	v'
430 nm Violet	Avonec 3W430435m Hyper Violet	($I_F = 750 mA$) 950 mW	0,235	0,039
450 nm Royalblau	Cree XPEBRY-L1-0000-00P02	575 mW	0,208	0,072
470 nm Blau	Cree XPEBBL-L1-B40-M3	45 lm	0,140	0,184
520 nm Grün 1	Cree XPEBGR-G2-Q4	100 lm	0,057	0,566
520 nm Grün 2	Cree XPEGRN L1 G4 Q4	100 lm	0,059	0,570
550 nm Grün	KEM-HP1-3WG	102 lm	0,109	0,578
620 nm Rot	Cree XPEBRD-R20-P4	80,6 lm	0,529	0,520
660 nm Tiefrot	Cree XPEPHR-L1-P3-15-C	425 mW	0,582	0,513

Tabelle 4.1: Auswahl der LEDs des Prototyps. Angaben des Lichtstromes im Datenblatt bei $I_F = 350 mA$. Die Farborte sind bei $I_F = 500 mA$ gemessen

LEDs

Aus den Anforderungen und dem Lösungsansatz aus Kapitel 4.1 ergibt sich die Auswahl der LEDs anhand deren Peak-Wellenlänge. Die Verfügbarkeit von LEDs verschiedener Wellenlängen mit 1 W Leistung ist begrenzt. Für den Prototyp werden verfügbare Wellenlängen auf Basis der melanopischen Wirkungsfunktion $s_{mel}(\lambda)$ nach 4.1 ausgewählt. Tabelle 4.1 listet die für den Prototyp verwendeten LEDs auf.

Der Lichtstrom bzw. der Strahlungsfluss der LEDs in Tabelle 4.1 wurde aus den Datenblättern entnommen. Die angegebenen Lichtströme im Datenblatt variieren. Bei den Cree-Modellen wird der Lichtstrom bei $I_F = 350 mA$ angegeben. Der dargestellte Farbort ist der gemessene Farbort bei einem Durchlassstrom von $I_F = 500 mA$. Der Durchlassstrom von $I_F = 500 mA$ ist der maximale Strom der verwendeten LED-Treiber. Der maximal Durchlassstrom der LEDs ist $I_F = 750 mA$. Abbildung 4.4 stellt die gemessenen Spektren und Abbildung 4.5 die Farborte der verwendeten LEDs bei einem Strom von 500 mA dar. In Abbildung 4.4 sind zusätzlich die relativen Transmissionsspektren des roten, grünen und blauen Farbfilter des LCPs dargestellt. Aus dieser Information folgt, dass die gewählten LEDs innerhalb der Transmissionsbereiche der Farbfilter liegen. Die 430 nm Violet-LED liegt am Rand des blauen Farbfilter und wird dadurch proportional stärker absorbiert.

Aus der relativen Häufigkeit der unterschiedlichen Zapfen von L:M:S mit 40:20:1 aus Kapitel 2.2.1 lässt sich das Verhältnis zwischen den RGB-Farben abschätzen. Anandan verwendet für eine LED-Hintergrundbeleuchtung ein Verhältnis von 64 % Grün, 28 % Rot und 8 % Blau (Anandan 2006). Chao et al. verwendet für eine LED-Hintergrundbeleuchtung ein Verhältnis von 73,8 % Grün, 19,1 % Rot und 7,1 % Blau (Chao et al. 2008).

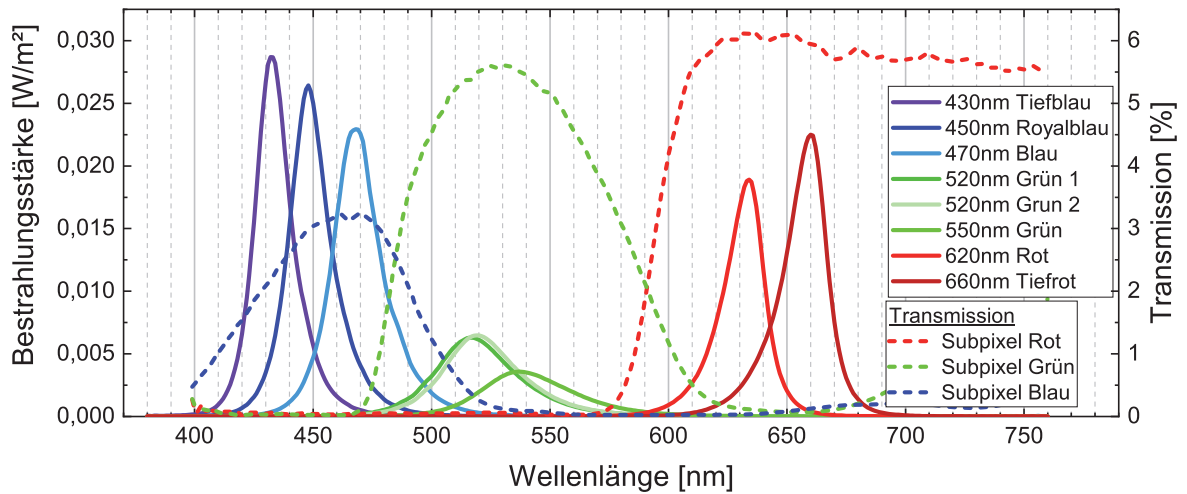


Abbildung 4.4: Spektrale Bestrahlungsstärke der verwendeten LEDs bei 500 mA Strom und Transmission der roten, grünen und blauen Subpixel

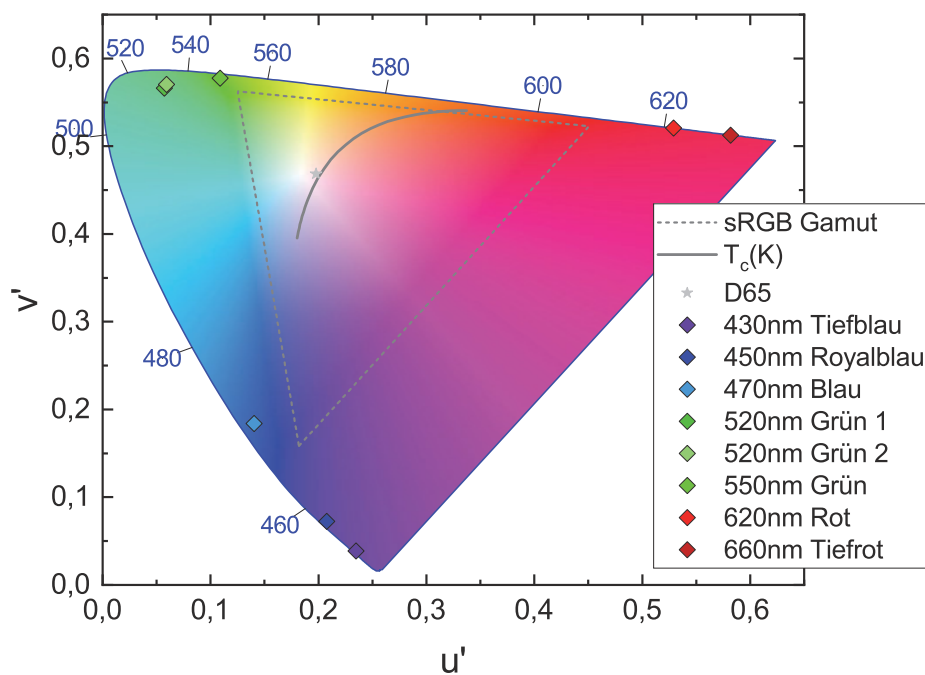


Abbildung 4.5: Farborte der verwendeten LEDs bei 500 mA Strom

Zeiler und Hüttner zeigen ein LED-Backlight mit 1 W LEDs, die in einem RGGB-Array mit einem Abstand von 85 mm flächig hinter dem LCP. Der CwD-Prototyp wird auf Basis eines 24 Zoll Displays realisiert. Die Grundplatte der Hintergrundbeleuchtung (Abbildung 4.6) ist

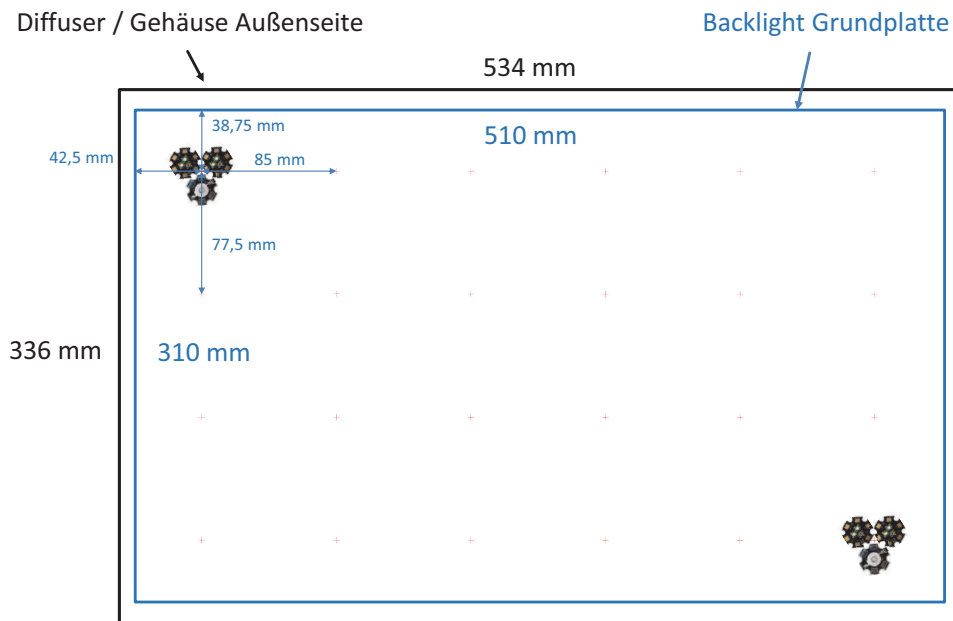


Abbildung 4.6: Grundplatte des LED-Trägers und Wanne der Hintergrundbeleuchtung

Name LEDs	Anzahl LEDs	Lichtstrom [lm]	Gesamt Lichtstrom [lm]
470 nm Blau	24	45	1 080
520 nm Grün 1	24	100	2 400
520 nm Grün 2	24	100	2 400
620 nm Rot	24	80,6	1 934
Gesamt	96	325,6	7 814,4

Tabelle 4.2: Abschätzung des Lichtstroms der LED-Hintergrundbeleuchtung

510 mm x 310 mm. Durch den Abstand von 85 mm ergibt sich die Anzahl an LEDs von sechs in der Horizontalen und vier in der Vertikalen. Insgesamt sind es 24 LEDs.

Tabelle 4.2 zeigt die Addition der Lichtströme für 24 LEDs in der RGB-Kombination des Tagmodus. Bei maximaler Ansteuerung der Hintergrundbeleuchtung ergibt sich ein Lichtstrom von 7 814,4 lm mit einer Aufteilung von 61,4 % Grün, 24,8 % Rot und 13,8 % Blau.

Aus dem gesamten Lichtstrom der Hintergrundbeleuchtung $\phi_v = 7 814,4 lm$ und der Abstrahlcharakteristik der LEDs von $\omega = 135^\circ$, lässt sich die Lichtstärke nach Gleichung 4.3 und die Leuchtdichte nach Gleichung 4.4 berechnen.

$$I_v = \frac{\phi_v}{\Omega} = \frac{7 814,4 lm}{3,88 sr} = 2 014 cd \quad (4.3)$$

mit $\Omega = 4\pi \sin^2 \frac{\omega}{4}$. Zur Berechnung der Leuchtdichte wird für A die Fläche des 24 Zoll Monitors verwendet.

$$L_v = \frac{I_v}{A} = \frac{2014 \text{ cd}}{0,54 \text{ m} * 0,344 \text{ m}} = 10842 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \quad (4.4)$$

Mit einer Leuchtdichte von 10842 cd/m^2 und einer angenommenen Transmission von etwa 3% des LCP (Lee 2009) ergibt sich eine resultierende Leuchtdichte von $325,26 \text{ cd/m}^2$ bei einem Durchlassstrom von $I_F = 350 \text{ mA}$. Die Leuchtdichte ist hierbei bereits ausreichend für einen typischen Büromonitor. Der Durchlassstrom kann bis auf $I_F = 500 \text{ mA}$ erhöht werden. Damit ist eine Erhöhung der Leuchtdichte möglich.

LED-Treiber

Als LED-Treiber wird eine dimmbare Konstantstromquelle mit maximal 500 mA Ausgangsstrom benötigt. Es wird der Nautilus-Controller (H63194; Projektnummer P368) der Firma „Digital Elektronik GmbH“¹ ausgewählt. Der Nautilus-Controller wird mit 48 V Spannung betrieben und besitzt drei Ausgänge, die über das DMX²-Protokoll gedimmt werden können. Die LED mit der maximalen Vorwärtsspannung bei 500 mA ist die 550 nm Grün mit $3,38 \text{ V}$. Da nicht alle 24 LEDs mit einem Controller gesteuert werden können, werden die einzelnen LEDs in zwei Gruppen mit jeweils 12 LEDs aufgeteilt. 12 LEDs für die obere Displayhälfte und 12 LEDs für die untere Displayhälfte. Ein weiterer Grund für die Aufteilung der LEDs ist die Evaluierung der Farbwahrnehmung in Kapitel 5.1. Bei dieser Untersuchung wird die Hintergrundbeleuchtung des Displays im oberen und unteren Displayteil mit jeweils einer unterschiedlichen LED-Kombination betrieben. 12 LEDs mit maximal jeweils $3,38 \text{ V}$ Spannung (gemessener Maximalwert) ergeben in Reihe geschaltet eine Spannung von $40,56 \text{ V}$. Mit dem 48 V Nautilus-Controller ist ein Betrieb innerhalb der Spezifikationen möglich.

Durch die Auswahl der sieben LEDs (Tabelle 4.1) und die doppelte Anzahl an 520 nm und 550 nm grünen LEDs werden insgesamt neun steuerbare Kanäle für die sieben Farben benötigt. Durch die Aufteilung der LEDs in zwei Gruppen (zwei mal neun Kanäle) werden sechs Nautilus-Controller mit insgesamt 18 Kanälen für den CwD-Prototyp verwendet.

¹DIGITAL ELEKTRONIK GmbH, Berchtesgadner Str. 10, A-5083 St. Leonhard/Salzburg, Österreich <http://www.de.at/>

²DMX steht für Digital Multiplex und ist ein digitales Steuerprotokoll basierend auf RS-485 nach internationalem Standard EIA-485.

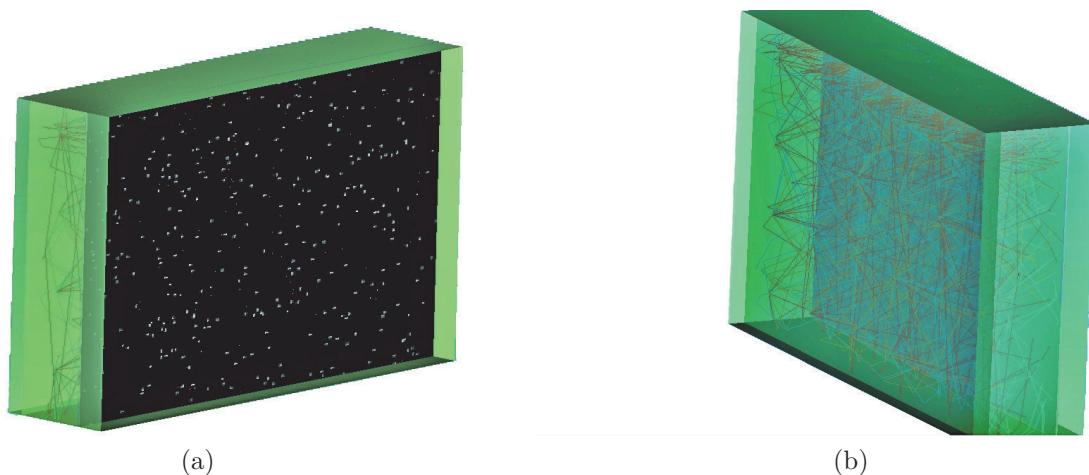


Abbildung 4.7: Visualisierung der ZEMAX Simulation der Displayhintergrundbeleuchtung. Grüne Fläche ist Reflektor der Displaywanne, schwarze Fläche ist der Detektor

4.3.2 Simulation der Displayhintergrundbeleuchtung

Damit die Hintergrundbeleuchtung möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet ist, wird für die Konstruktion des Gehäuses der Hintergrundbeleuchtung der Abstand zwischen den LEDs und des Diffusors simuliert. Dies wird mit der Optik-Simulationssoftware Zemax durchgeführt (Moore 2012).

Optimierungsfunktion der Displayhintergrundbeleuchtung

Abbildung 4.7 stellt die Visualisierung des Modells zur Optimierung der gleichmäßigen Ausleuchtung dar. Ausgehend von der Größe der Wanne der Hintergrundbeleuchtung und der Trägerplatte der LEDs (s. Abbildung 4.6) wird das Modell in Zemax erstellt. Die Seitenwände der Wanne sind ein ideal weißer diffuser Reflektor (grüne Flächen) mit einer Höhe von 120 mm . Der Diffuser (schwarze Fläche) ist der Detektor. Es sind 24 weiße LEDs im Modell integriert. Die Firma Cree bietet für die Produkte der XPE-Serie Dateien für Zemax an, mit den gemessenen Abstrahlcharakteristiken der LEDs.

Die Optimierung des Abstandes der Diffusorplatte zu den LEDs basiert auf der Merit-Funktion. Merit-Funktionen sind ein numerisches Verfahren zur Optimierung nichtlinearer optischer Systeme (Alt 2002). Zemax bietet zur Optimierung nicht-sequenzieller optischer Systeme zwei Algorithmen an: DLS (Damped Least Squares) und OD (Orthogonal Descent). Die DLS-Methode entspricht dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus und ist ein Standardverfahren in der Optimierung optischer Systeme (Levenberg 1944; Marquardt 1963). Die Optimierung wird mit der DLS-Methode folgendermaßen implementiert: Der Abstand der Detektorfläche (Diffusor) zu

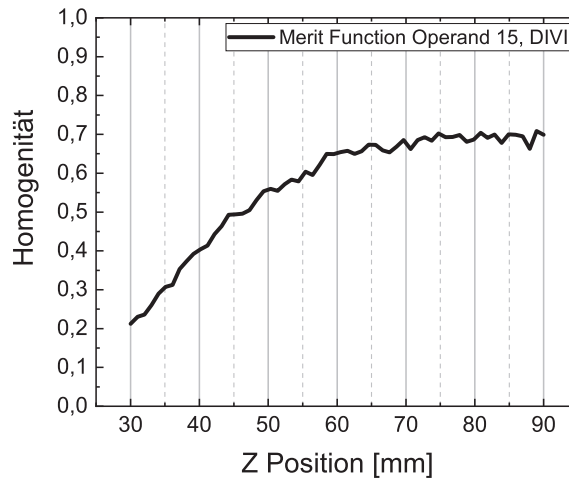


Abbildung 4.8: Homogenität der simulierten Ausleuchtung, aufgetragen über dem Abstand des Diffusers zu den LEDs

den LEDs ist die Variable auf der Z-Achse. Zwischen 30 mm und 90 mm wird die Detektorfläche in Schritten von 1 mm erhöht. Der Detektor erfasst mit einer Auflösung von $200\text{ Mal } 200$ Pixel die einzelnen Lichtstrahlen. Jede der 24 LEDs in der Simulation strahlt $5 \cdot 10^5$ Analysestrahlen aus. Die Berechnung der Homogenität der Ausleuchtung ergibt sich aus der minimal am Detektor auftreffende Leuchtdichte geteilt durch die maximal auftreffende Leuchtdichte.

Ergebnisse der Optimierung der Hintergrundbeleuchtung

Abbildung 4.8 zeigt die Ergebnisse der simulierten Homogenität der Ausleuchtung abhängig vom Abstand der Diffusorfläche von den LEDs. Bei einem Abstand von 83 mm ist die simulierte Homogenität 70% . Abbildung 4.9 stellt die simulierte Leuchtdichteverteilung bei 70 mm und 83 mm dar. Obwohl in Abbildung 4.8 ab einem Abstand von 75 mm eine Annäherung der Kurve an 70% zu sehen ist, zeigen die beiden Bilder der Detektorfläche (Abbildung 4.9) bei 83 mm eine homogenere Ausleuchtung.

Es muss erwähnt werden, dass die Simulation auf die Diffusorplatte der Hintergrundbeleuchtung begrenzt ist. Die in Kapitel 2.4 beschriebene Verwendung weiterer Folien (Diffusor, BEF, DBEF) werden die Homogenität weiter verbessern. Aufgrund der Komplexität und des enormen Rechenaufwandes einer solchen Simulation wird in dieser Arbeit darauf verzichtet. Für die Simulation des Hintergrundbeleuchtung des dargestellten Modells benötigt der verwendete Hochleistungs-PC etwas sieben bis acht Stunden. Bei einem Experiment mit der Einbringung einer BEF-Prismenfolie in die Simulation wurde der Rechenvorgang nach sieben Tagen abgebrochen.

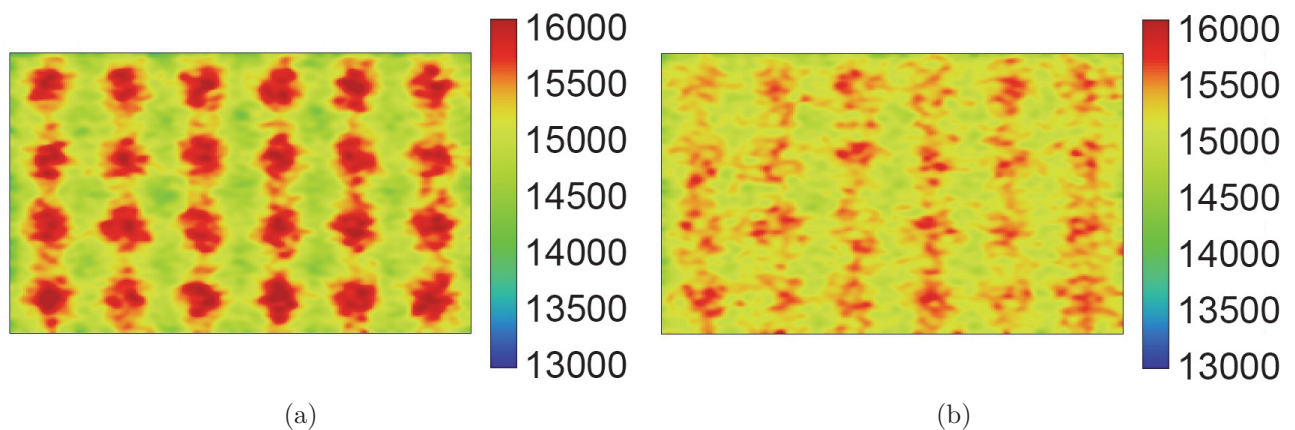


Abbildung 4.9: Ergebnisse der Optimierungsfunktion bei 70 mm (a) und 83 mm (b) Abstand

4.3.3 Konstruktion des CwD-Prototyps

Der CwD-Prototyp basiert auf der Grundlage zweier 24 Zoll Monitore; dem HP LP2475w und dem HP LP2480zx. Der erste Monitor (HP LP2475w) wurde vollständig demontiert. Die Wanne der Hintergrundbeleuchtung wurde mittels PVC-Platten erhöht. Grund waren die Ergebnisse der Optimierungsfunktion aus Kapitel 4.3.2. Abbildung 4.10(a) zeigt die Wanne der Hintergrundbeleuchtung mit den PVC-Platten. In die Aussparung der kurzen Seite werden die originalen Kunststoffträger der Diffusorplatte und der Folien eingeklebt. Nach Abbildung 4.6 werden die LEDs auf eine Aluminiumplatte ($510 \times 310\text{ mm}$) mittels eines silberhaltigen Zweikomponenten-Klebers (Wärmeleitkleber) aufgeklebt. Der Abstand zwischen dem Zentrum des LED-Clusters ist 85 mm in der Horizontalen und $77,5\text{ mm}$ in der Vertikalen. Abbildung 4.10(b) zeigt die auf die Aluminiumplatte geklebten und verkabelten LEDs. Die Aluminiumplatte ist mit der Wanne fest verschraubt. Zwischen den beiden Platten befindet sich eine Wärmeleitpaste. Die Abwärme der LEDs wird an das Gehäuse abgeführt. Die Wanne wird mit einer weißen, diffus reflektierenden Folie ausgekleidet. Für die LEDs sind, wie in Abbildung 4.11(a) dargestellt, Öffnungen vorhanden.

Erster Displayprototyp

Auf Basis des Displays HP LP2475w wird der erste Prototyp realisiert. Das LCP ist das Modell LM240WU4(SL)(A1) des Joint-Venture-Unternehmens LG.Philips LCD. Das LCP kann für Rot, Grün und Blau jeweils acht Bit Stufen darstellen. Die Wanne der Hintergrundbeleuchtung wird mittels eines Stegs (Abbildung 5.1(a) in Kapitel 5.1) geteilt. Die Trennung der Hintergrundbeleuchtung wird für die Farbwahrnehmungsuntersuchung benötigt. Abbildung 4.11(b) zeigt den ersten Prototyp. Die LED-Controller sind neben dem Display platziert.

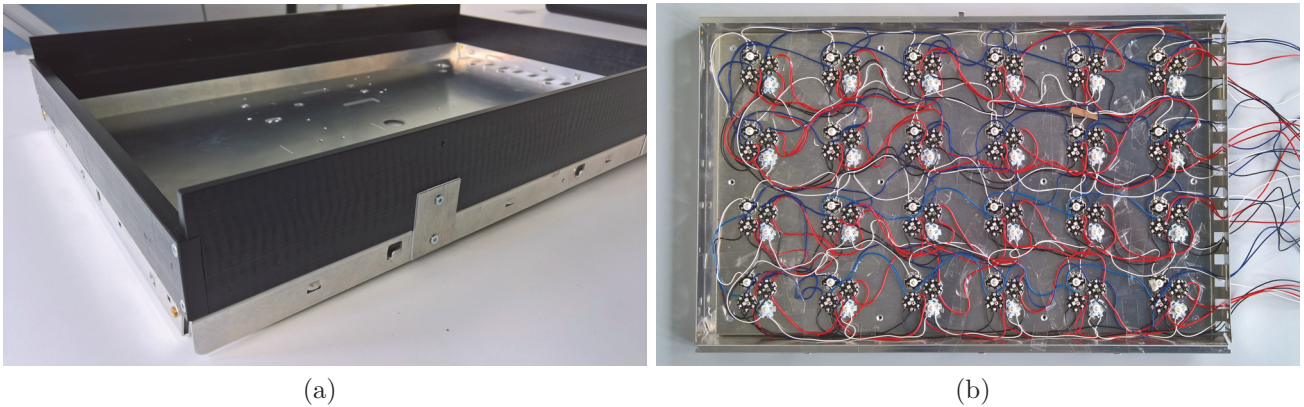


Abbildung 4.10: Konstruktion der Gehäusewanne (a) und eingeklebte LEDs (b)

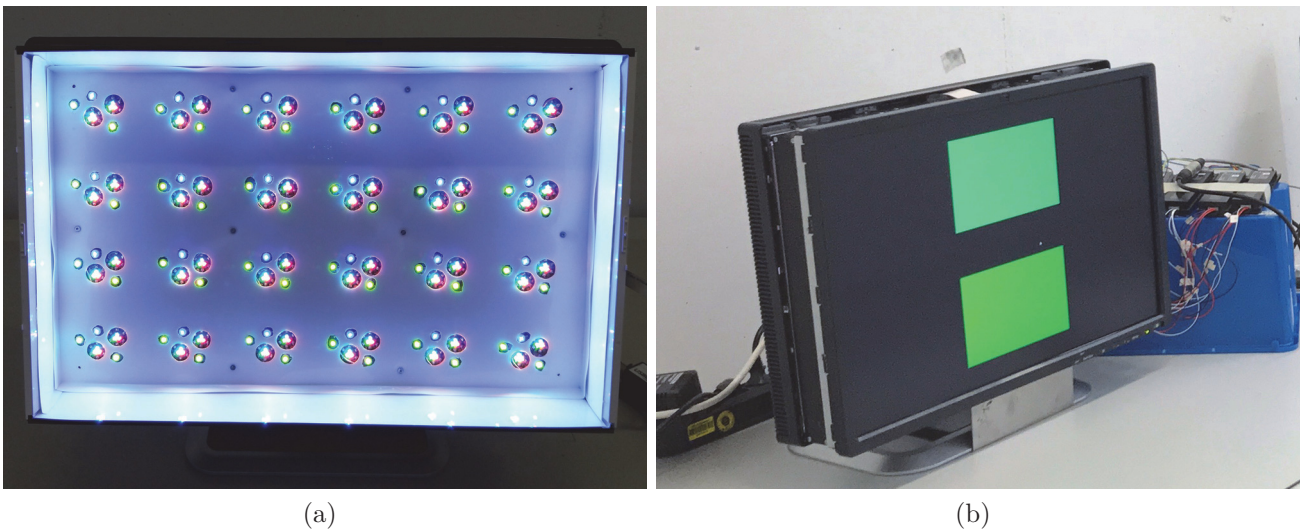


Abbildung 4.11: LEDs der BLU mit Reflektorabdeckung (a). Erster Displayprototyp mit geteiltem Backlight (b)

Zweiter Displayprototyp

Auf Basis des Displays HP LP2480zx wird der zweite Prototyp realisiert. Das LCP ist das Modell LM240WU5(SL)(A1) des Joint-Venture-Unternehmens LG.Philips LCD. Das LCP kann für Rot, Grün und Blau jeweils zehn Bit Stufen darstellen. Der zweite Prototyp ist die finale Version des CwD-Prototyps. Die LED-Controller sind auf der Rückseite in einem Gehäuse integriert (Abbildung 4.12). Die Stromversorgung³ der LEDs ist ebenfalls auf der Rückseite des Displays angebracht.

³Die Stromversorgung der LED-Treiber sind zwei Schaltnetzteile Modell PLN-100-48 der Firma MEAN WELL ENTERPRISES CO., LTD. Taiwan.



Abbildung 4.12: Zweiter CwD-Prototyp

4.3.4 Optische Vermessung des Displayprototyps

Die optische Vermessung des Displays wird anhand der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Methoden sowie standardisierter Messmethoden für Displays durchgeführt, die im „Information Display Measurements Standard“ der SID zusammengefasst werden (Society for Information Display 2012). Folgende Parameter der CwD-Prototyp werden gemessen:

- Leuchtdichte, Kontrast, Spektrum und Farbraum
- Homogenität der Ausleuchtung
- Gamma
- Farbabstand und Metamerieindex zwischen den beiden Weißpunkten des Tag- und Nachtmodus

Hintergrundbeleuchtung des Displayprototyps

Die erste Abschätzung der Leuchtdichte des CwD-Prototyps, ergibt eine Leuchtdichte von $10\,842\text{ cd/m}^2$. Abbildung 4.13 zeigt die Leuchtdichteverteilung der BLU in den beiden RGB-Kombinationen 470 nm , 520 nm , 630 nm und 450 nm , 550 nm , 660 nm . Abbildung 4.13(a) zeigt die erste RGB-Kombination mit maximal $17\,200\text{ cd/m}^2$ bei maximaler Ansteuerung der LEDs, eine Homogenität von 71,74 % im 80 % Flächenbereich und 83,37 % im 50 % Flächenbereich. Der 100 % Flächenbereich wird nicht angegeben, da in den Ecken des Displays das Gehäuse mit sehr dunklen Stellen im Messbereich liegen. Der 80 % Flächenbereich entspricht den Eckpunkten einer Neunpunktmessung der Homogenität (Society for Information Display 2012). Abbildung

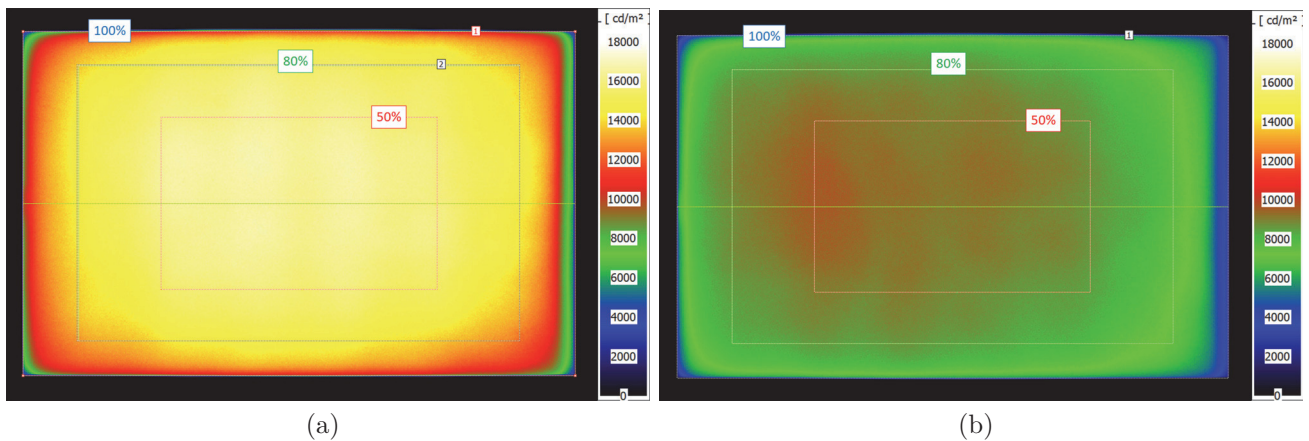


Abbildung 4.13: Leuchtdichteverteilung der BLU mit der RGB-Kombination 470 nm, 520 nm, 630 nm (a) und mit der RGB-Kombination 450 nm, 550 nm, 660 nm (b)

4.13(2) zeigt die zweite RGB-Kombination mit maximal $9\,906\text{ cd/m}^2$ und eine Homogenität von 69,93 % im 80 % Flächenbereich und 81,79 % im 50 % Flächenbereich.

Die gemessene Leuchtdichteverteilung der BLU entspricht der Abschätzung nach Formel 4.4. Die Homogenität entspricht mit etwa 70 % den Simulationsergebnissen aus Kapitel 4.3.2.

Leuchtdichte, Kontrast, Gamma, Spektrum und Farbraum

Die Leuchtdichte, Kontraste und Farborte der Weißpunkte sind in Tabelle 4.3 zu sehen. Es wird die Messungen des Tagmodus, Nachtmodus, sowie des Nachtmodus mit der 430 nm LED anstatt der 450 nm LED angegeben. Abbildung 4.14 zeigt das Spektrum und den Farbraum des kalibrierten CwD-Prototyps. Der Gammawert wird aus den Messwerten der Charakterisierung des Displays (vgl. Anhang B.2) für Weiß mit $\gamma = 1,82$ berechnet. Die Farbcharakterisierung basiert auf den Messungen von jeweils 32 Testfarben für Rot, Grün, Blau und Weiß nach DIN 61966-4 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2000-12-01).

Die Farborte der Primärfarben, die Gamut-Flächen des Tag- und Nachtmodus sowie die relative Gamut-Fläche, bezogen auf den sRGB-Gamut, sind in Tabelle 4.4 zu sehen. Der Farbraum-Gamut berechnet sich nach Formel 2.22. Die Gamut-Flächen des Tag- und Nachtmodus sind relativ zum sRGB-Gamut mit 33,13 % deutlich größer. Der gemeinsame Gamut des Tag- und Nachtmodus ist 34,81 % des Gesamtfarbraumes. Dies ist eine relative Gamut-Fläche von 105 % in Bezug auf den sRGB-Gamut.

Display	CwD-Prototyp		
Backlight	Tagmodus	Nachtmodus	Nachtmodus 430 nm
$L_{v,W}$ [cd/m^2]	312,23	312,69	312,06
$L_{v,K}$ [cd/m^2]	0,451	0,438	0,435
$C_S = L_{v,W}/L_{v,K}$	692	714	717
Farbtemperatur [K]	6 520	6 544	6 537
Farborte und Tristimulus der Weißpunkte			
λ_d	489,09	488,65	488,8
u'	0,1976	0,1977	0,1976
v'	0,4684	0,468	0,4682
X	296,38	297,14	296,4
Y	312,23	312,69	312,06
Z	339,61	341,87	340,63
DMX-Dimmwerte			
430 nm Violet	-	-	166
450 nm Royalblau	-	103	-
470 nm Blau	114	-	-
520 nm Grün 1&2	59	-	-
550 nm Grün	-	195	214
620 nm Rot	128	-	-
660 nm Tiefrot	-	173	180

Tabelle 4.3: Photopische Messung des CwD-Prototyps mit zugehörigen DMX-Dimmwert

Display	CwD-Prototyp					
Backlight	Tagmodus		Nachtmodus		Nachtmodus 430 nm	
CIE UCS	u'	v'	u'	v'	u'	v'
Rot	0,5318	0,5169	0,5451	0,5128	0,5451	0,5128
Grün	0,0678	0,5627	0,1031	0,5775	0,1031	0,5775
Blau	0,1382	0,1969	0,198	0,1067	0,2292	0,0415
A [%]	42,64		51,72		58,58	
$A_{rel.}$ [%]	128,7		156,1		176,8	

Tabelle 4.4: Farborte und Gamut des CwD-Prototyps. Der relative Gamut $A_{rel.}$ nimmt Bezug auf den sRGB-Gamut mit 33,13 %

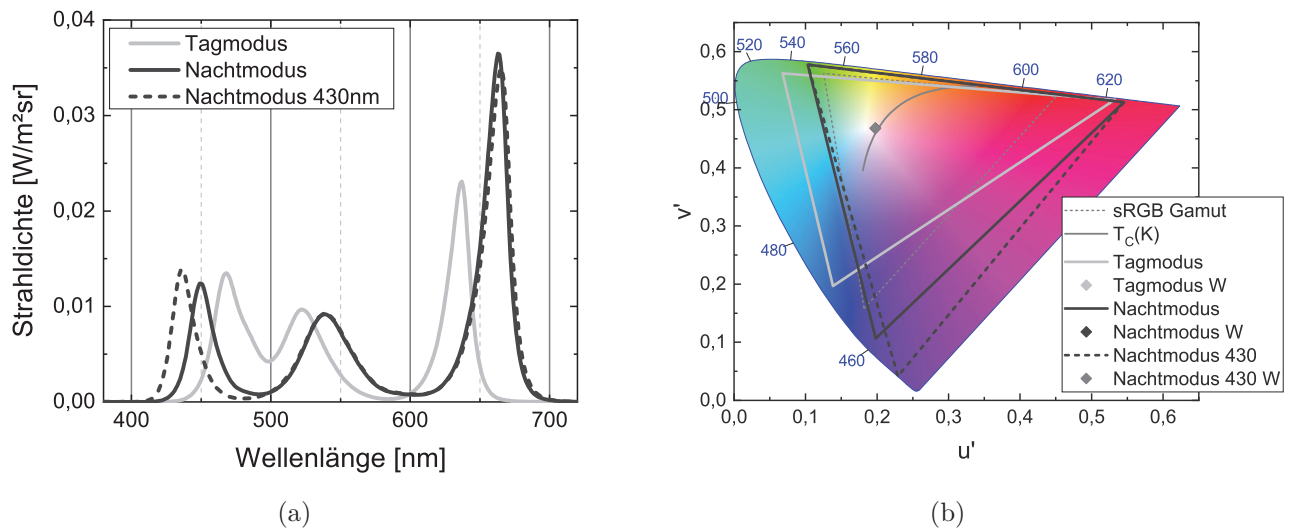


Abbildung 4.14: Spektrum des CwD-Prototyps (a) und Farbraum (b) des Tag- und Nachtmodus sowie des Nachtmodus 430 nm

Homogenität der Ausleuchtung

Abbildung 4.15 zeigt die Leuchtdichteverteilung des zweiten CwD-Prototyps im Tagmodus (a) und Nachtmodus (b). Die Homogenität der Ausleuchtung im Tagmodus beträgt $75,29\%$ im 80% Flächenbereich und $86,16\%$ im 50% Flächenbereich. Die Homogenität der Ausleuchtung im Nachtmodus beträgt $77,71\%$ im 80% Flächenbereich und $86,49\%$ im 50% Flächenbereich. Durch die optischen Verbesserungsschichten (OEF) ist die Homogenität des LCD gestiegen im Vergleich zur BLU.

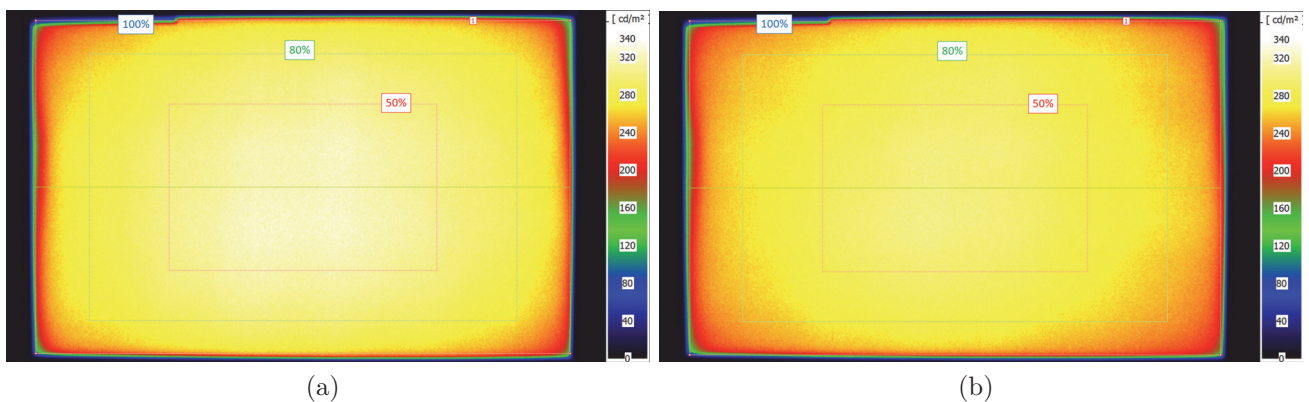


Abbildung 4.15: Leuchtdichteverteilung des CwD-Prototyps im Tagmodus (a) und im Nachtmodus (b)

Farbabstand und Metamerieindex zwischen den beiden Weißpunkten des Tag- und Nachtmodus

Der Farbabstand zwischen den beiden Weißpunkten des Tag- und Nachtmodus ist $\Delta E_{u'v'} = 0,0004$, $\Delta E_{L^*a^*b^*} = 0,584$ beziehungsweise $\Delta E_{00} = 0,47$. Der Farbabstand zwischen den beiden Weißpunkten des Tag- und Nachtmodus (430 nm) ist $\Delta E_{u'v'} = 0,0002$, $\Delta E_{L^*a^*b^*} = 0,382$ beziehungsweise $\Delta E_{00} = 0,307$. Der Metamerieindex zwischen dem Tag- und Nachtmodus ist $M_{ilm} = \Delta E_{ab}^* = 0,577$. Zwischen dem Tag- und Nachtmodus (430 nm) ist der Metamerieindex $M_{ilm} = \Delta E_{ab}^* = 0,380$.

5 Evaluierung der Methode

In diesem Kapitel wird die Beleuchtungsmethode des metameren Weißpunktes mithilfe des CwD-Prototyps evaluiert. Insbesondere wird die zusammenfassende Fragestellung diskutiert: Kann ein Displaysystem realisiert werden, bei dem sich der visuelle Eindruck der angezeigten Bildinhalte nicht verändert, die Wirkung des Lichts auf den Menschen jedoch veränderbar ist?

Folgende Fragestellungen werden bei der Evaluierung betrachtet:

- Ab welchem Farbabstand bei spektraler Änderung der Hintergrundbeleuchtung nimmt der Beobachter die Farbveränderung wahr?
- Wie ist die wahrgenommene Bildqualität in einem Display mit Blaulichtreduzierung?
- Wie ist die wahrgenommene Bildqualität in einem Display mit spektraler Verschiebung der Peak-Wellenlänge der Primärfarben?
- Ist die nicht-visuelle Lichtwirkung bei der Verschiebung der Peak-Wellenlängen größer als bei der Blaulichtreduzierung?

5.1 Untersuchung der Farbwahrnehmung bei variablem Farbspektrum

Displaysysteme haben abhängig von der dargestellten Farbe unterschiedliche Toleranzen in der Genauigkeit der Farbreproduktion. Beispielsweise ist ein typischer Wert im Blaubereich $\Delta E_{Luv} = 70$ und im Grünbereich $\Delta E_{Luv} = 28$ (Kapitel 2.3.3) (Blankenbach 2016a).

Die Evaluierung der Farbwahrnehmung behandelt die Frage, in wie weit die Nutzer einen Farbunterschied als wahrnehmbar und störend empfinden, wenn sich die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtung ändert. Folgende Voruntersuchung wird zur Beantwortung dieser Frage durchgeführt. Ziel der Voruntersuchung sind grundlegende Informationen und Erkenntnisse über den Zusammenhang gemessener und wahrgenommener Farbabstände.

5.1.1 Methode und Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Farbwahrnehmungsuntersuchung wird der erste Displayprototyp nach Kapitel 4.3.3 verwendet. Die Wanne der Displayhintergrundbeleuchtung ist durch eine horizontale Trennwand in zwei Bereiche unterteilt; einen oberen und einen unteren Displayteil. Durch diese Modifikation kann ein Vergleich zweier Bildinhalte mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung der Hintergrundbeleuchtung erreicht werden. Abbildung 5.1(a) zeigt die geteilte Wanne der Hintergrundbeleuchtung. Der **obere** Displayteil stellt das Spektrum des Tagmodus dar. Der **untere** Displayteil stellt das Spektrum des Nachtmodus dar. Für den Tagmodus wird eine RGB-Kombination folgender LEDs gewählt 470 nm Blau, 520 nm Grün und 620 nm Rot. Die Nachtmodus RGB-Kombination besteht aus 450 nm Royalblau, 550 nm Grün und 620 nm Rot. Die 430 nm Tiefblau oder Purpurblau LEDs werden bei diesem Test nicht verwendet. Blaue Bildinhalte werden bei diesem Spektrum als Violett wahrgenommen. 660 nm Tiefrot wird ebenfalls nicht verwendet. In der Voruntersuchung wird eine Primärfarbe als konstant gewählt, die sich zwischen den beiden untersuchten Spektren nur in der Helligkeit unterscheidet. Rot ist die Farbe mit der geringsten nicht-visuellen Lichtwirkung und wird in dieser Untersuchung nicht spektral verändert.

Der gleichzeitige Vergleich zweier Bildinhalte ist der maximale Anspruch an die darstellende Bildqualität, da kleinste Farbunterschiede wahrgenommen werden können (vgl. Kapitel 2.2.2). Im ersten Moment der Betrachtung werden feinste Unterschiede in der Helligkeit und der Farbe wahrgenommen. Durch die chromatische Adaption, dem automatischen Weißabgleich des Auges und der Farbkonstanz passen sich das Auge und die Wahrnehmung der Situation an und die Unterschiede verringern sich. Dies kann bis zu 30 s dauern (Fairchild 2013; Frings und Müller 2014). Folglich werden die Testfarben den Probanden nur wenige Sekunden gezeigt.

Bildinhalte für Probandenstudie

Das Testprogramm zur Darstellung der Testfarben und Testbilder wurde mit der Programmiersprache Python erstellt (Maier D. et al. 2017-10-24; Python Software Foundation 2018). Die grafische Benutzerschnittstelle (GUI) des Testprogramms stellt dem Probanden zwei Testfelder, die jeweils in der Mitte der oberen und unteren Hälfte des Displays positioniert sind, auf einem schwarzen Hintergrund dar. Beide Testfelder haben eine Größe von $17,3\text{ cm}$ in der Horizontalen und $10,9\text{ cm}$ in der Vertikalen. Für den Probanden ergibt sich bei einem Beobachtungsabstand von 70 cm ein Betrachtungswinkel von 14° horizontal und 9° vertikal. Abbildung 5.1(b) zeigt die Testfelder für eine grüne Testbildfarbe (R=0/G=255/B=0) bei unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung der Hintergrundbeleuchtung.

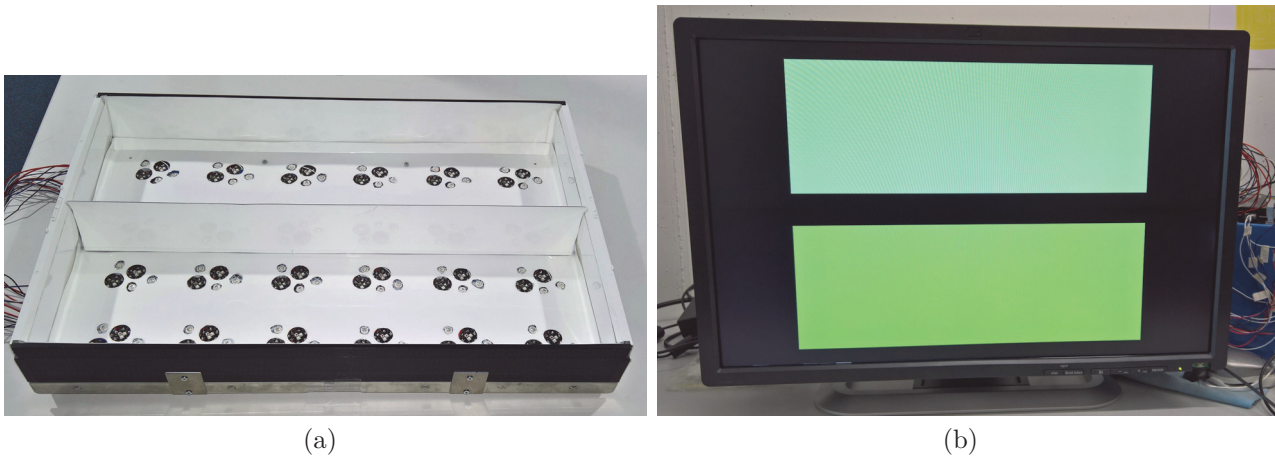


Abbildung 5.1: Hintergrundbeleuchtung des Prototyps mit Trennwand (a). Darstellung der Testfarbe Grün (R=0/G=255/B=0) oben und unten ohne Farbanpassung bei unterschiedlichem Spektrum der Hinterleuchtung

Die Abbildung der grünen Testfarbe zeigt einen wahrnehmbaren Farbunterschied. Abbildung 5.2 zeigt die Spektren des oberen und unteren Displayteils für die kalibrierten Farborte der Weißpunkte: oben (Tagmodus) $u' = 0,2043$ und $v' = 0,4579$ sowie unten (Nachtmodus) $u' = 0,2034$ und $v' = 0,4568$.

Zur Erstellung der Testfarben werden die Displayhälften nach der Methode aus Kapitel 2.4.2 charakterisiert. Der Zusammenhang zwischen den RGB-Werten und des Tristimulus wird nach Gleichung 2.16 berechnet. Der Gammawert wird aus den Messungen der Einzelfarben mit $\gamma = 1,82$ bestimmt. Die Charakterisierungen der oberen Displayteils (Tagmodus) ist in Gleichung 5.1 und des unteren Displayteils (Nachtmodus) in Gleichung 5.2 dargestellt.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6539 & 0.1707 & 0.1577 \\ 0.2828 & 0.6159 & 0.1014 \\ 0.0115 & 0.1725 & 1.0379 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R^{1,82} \\ G^{1,82} \\ B^{1,82} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4803 & 0.3008 & 0.2193 \\ 0.2135 & 0.7370 & 0.0495 \\ 0.0113 & 0.0483 & 1.1628 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R^{1,82} \\ G^{1,82} \\ B^{1,82} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Details der gemessenen Farbwerte der Charakterisierungen sind in Anhang B.2.1 für den Tagmodus und in B.2.2 für den Nachtmodus zu finden.

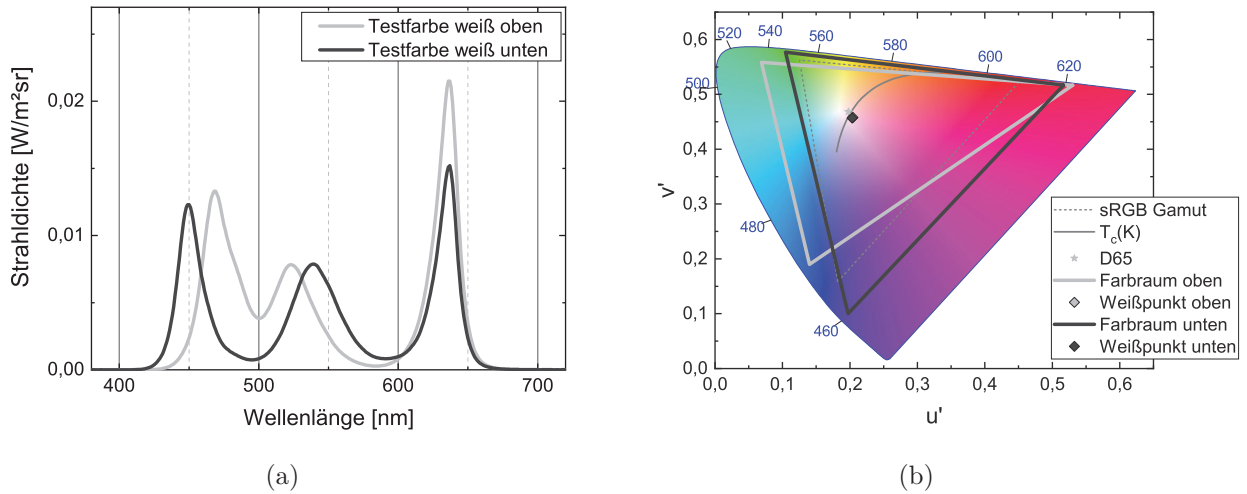


Abbildung 5.2: Spektren der gemessenen Weißpunkte der Displayhälften (a) und Farbraum mit den Farbort oben $u' = 0,2043$ $v' = 0,4579$ sowie unten $u' = 0,2034$ $v' = 0,4568$ (b)

Für die Probandenstudie wird ein Set aus 25 Testfarben erzeugt. Die Testfarben werden nach Formel 4.2 aus Kapitel 4.2 zwischen den Farbräumen umgerechnet. Ziel ist die Erstellung metamerer Bildschirm Inhalte für die obere und untere Displayhälfte. Tabelle B.3 in Anhang B.2.3 zeigt die RGB-Werte der 25 Testfarben für die obere und untere Displayhälften.

Zusätzlich werden fünf Farbfotografien als Testbilder gewählt, um die Natürlichkeit der Bildinhalte abzufragen. Die Testbilder enthalten Farben von Erdtönen, Grüntöne, verschiedene Blautöne zur Repräsentation von Wasser und Himmel sowie eine farbige Blumenwiese und Buntstifte. Abbildung 5.4 stellt die Testbilder dar. Die Testbilder werden jeweils in identischer Form und Größe auf dem oberen und unteren Displayteil dargestellt. Die Farbräume unterscheiden sich durch die Spektren der Hinterleuchtung.

Probandenkollektiv

An der Studie nahmen 31 Probanden teil. Die Probandenselektion erfolgte nach folgenden Einschluss- und Ausschlusskriterien.

Einschlusskriterien:

- Männliches und weibliches Geschlecht
- Alter zwischen 18 und 65 Jahre

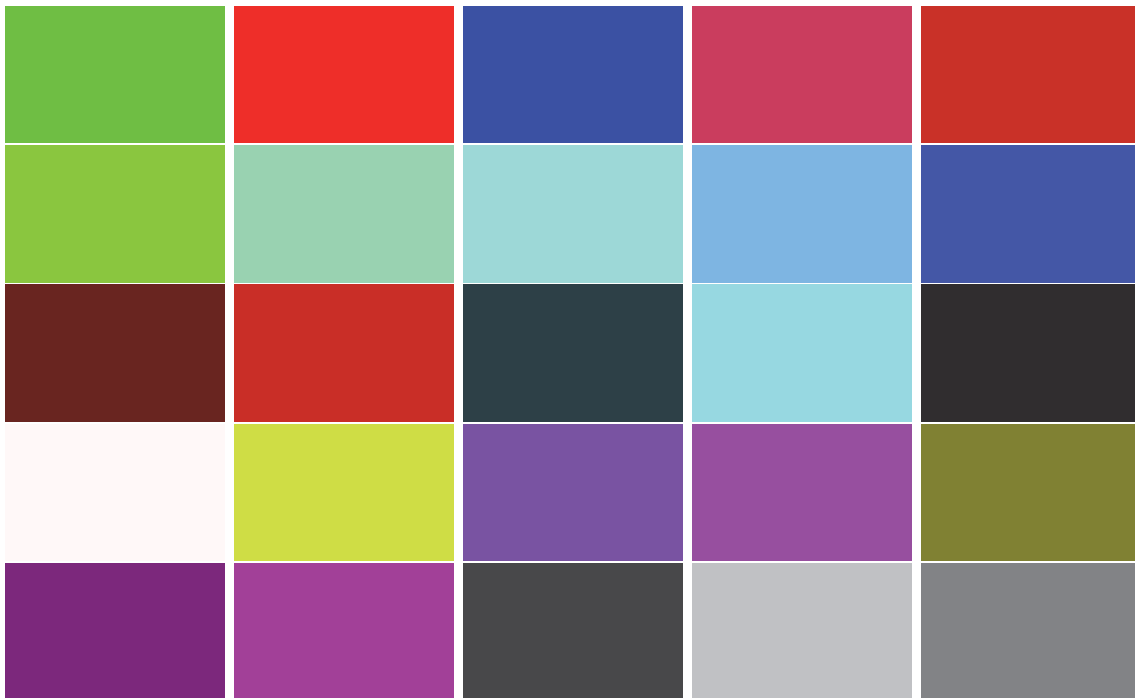


Abbildung 5.3: Testfarben der oberen Displayhälfte in der Reihenfolge der Nummerierung, beginnend von links nach rechts und oben nach unten



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Abbildung 5.4: Testbilder zur Untersuchung der Natürlichkeit der Bildinhalte (Bildnachweise in Anhang D.1)

- Farbgesunde Wahrnehmung
- Sehhilfe in Form von Kontaktlinse oder Brille mit korrigiertem Visus: $V_{CC} > 0,7$

Ausschlusskriterien:

- Farbsinnstörungen
- Augenerkrankungen die zu einer Farbfehlsichtigkeit führen wie Katarakt, Netzhauterkrankungen, Glaukom, Augenverletzungen
- Visus kleiner 0,7
- Gefärbte oder getönte Sehhilfe

Das in der vorliegenden Studie untersuchte Probandenkollektiv setzt sich aus 23 männlichen und acht weiblichen Probanden mit einem Mittelwert des Alters von 32,9 Jahren zusammen. Der älteste Proband ist 57 Jahre alt und der jüngste ist 22 Jahre; 14 Teilnehmer tragen eine Sehhilfe in Form von Kontaktlinsen oder einer Brille.

Versuchsaufbau

Die Studie wird in einem fensterlosen Raum mit $6,2\text{ m}$ auf $2,2\text{ m}$ und einer Deckenhöhe von $3,85\text{ m}$ mit einheitlichen Beleuchtungsbedingungen durchgeführt. Zur Überprüfung der Farb-tüchtigkeit des Probanden wird ein Farblegetest durchgeführt. Die Umgebungsbedingungen für den Farblegetest sind nach der Betriebsanleitung des Herstellers geschaffen (Richmond Products Inc. 2006). Ein separater Tisch wird mit einem schwarzen Tuch bedeckt. Über dem Tisch des Farblegetests ist eine zusätzliche Lichtquelle angebracht (True-Light[®] 36 W T8 Leuchtstoffröhre; $5\,500\text{ K}$; $R_a\,96$) in 98 cm Abstand. Die Beleuchtungsbedingungen während des Versuchsablaufes sind:

- Horizontale Beleuchtungsstärke auf Tischebene des Prototyps in 1 m Höhe: 450 lx bei $3\,800\text{ K}$ Farbtemperatur
- Horizontale Beleuchtungsstärke auf Tischebene des Farblegetests: 754 lx bei $4\,300\text{ K}$ Farbtemperatur
- Umgebungsleuchtdichte der Wand hinter dem Displayprototyp: 100 cd/m^2

Der Displayprototyp befindet sich mittig auf einem höhenverstellbaren Tisch mit den Abmaßen 180 cm auf 90 cm . Der Proband wird mittig vor das Display positioniert mit einem Abstand

zwischen den Augen und des Displays von 70 cm. Die Höhe des Tisches wird so eingestellt, dass die Oberkante des Display auf Augenhöhe des Probanden ist.

Durchführung der Probandenstudie

Der Displayprototyp, die Raumbelichtung und die True-Light-Leuchte wird mindestens eine Stunde vor Versuchsbeginn eingeschaltet. Dies gewährleistet die Betriebstemperatur aller Komponenten und eine Minimierung temperaturabhängiger Farbveränderungen des Displays und der Leuchten. Der Proband nimmt auf dem Stuhl vor dem Display Platz. Der Proband liest die Datenschutzerklärung sowie die Probandenaufklärung durch. Der Proband wird gebeten, den ersten Satz der Probandenaufklärung laut vorzulesen. Das laute Vorlesen eines Satzes mit der Schriftgröße 14 und einem Leseabstand von 50 cm dient der Kontrolle des Mindestvisus $V_{CC} > 0,7$. Der Studienleiter befragt den Probanden anhand des Anamnesebogens und füllt diesen aus. Zur Überprüfung der Farbtüchtigkeit des Probanden wird der verkürzte Ishiharatest (Ishihara 1972) unter der True-Light-Leuchte durchgeführt: Tafel 1, eine der Tafeln 2 oder 3, eine der Tafeln 4, 5, 6 oder 7, eine der Tafeln 8 oder 9, eine der Tafeln 10, 11, 12 oder 13 und eine der Tafeln 14 oder 15. Sind keine Auffälligkeiten am Ishiharatest aufgetreten, wird dem Probanden ein unsortierter, desaturierter Lathony D-15 Farblegetest gereicht. Für die Durchführung des Farblegetests gibt es kein Zeitlimit. Die Auswertung erfolgt nach Betriebsanleitung (Richmond Products Inc. 2006). Sind keine Ausschlusskriterien gefunden, startet der Test am Displayprototyp.

Das Testprogramm wählt randomisiert eines der 25 Testfarben aus und stellt jeweils das Bild für die obere und untere Displayhälfte dar. Jedes Bild wird ein einziges Mal dargestellt. Die Anzeigedauer der Testfarben wird auf zwei Sekunden gewählt. Die Auswahl der Anzeigedauer ist angelehnt an das Experiment von van der Lely et al. (van der Lely et al. 2015). Die Farbadaption des Probanden ist bei zwei Sekunden Anzeigedauer gering. Es bleibt bei zwei Sekunden aber ausreichend Zeit, die beiden dargebotenen Farben zu vergleichen. Im Anschluss an die Testfarben wird dem Probanden ein Schieberegler gezeigt. Diese visuelle Analogskala (VAS) ermöglicht dem Probanden eine stufenlose Einstellung seines subjektiv wahrgenommenen Unterschieds der dargebotenen Testfarben. Die Einteilung des horizontalen Schiebereglers geht von „kein Unterschied“ auf der linken Seite bis „deutlicher Unterschied“ auf der rechten Seite. Die zugeordneten numerischen Werte sind für „kein Unterschied“ 0 und für „deutlicher Unterschied“ 100. Nach der Bewertung durch den Probanden wird ein schwarzes Bild für fünf Sekunden angezeigt. Dies dient der Readaptation.

Zur Untersuchung der Natürlichkeit der Bildinhalt des Displayprototyps werden zusätzlich fünf Testbilder mit Farbfotografien dargeboten. Natürlichkeit ist definiert als der Grad der Überein-

	$\Delta E_{L^*a^*b^*}$	$\Delta E_{u'v'}$	ΔE_{00}		$\Delta E_{L^*a^*b^*}$	$\Delta E_{u'v'}$	ΔE_{00}
Farbe 1	82,49	0,0402	14,83	Farbe 14	12,81	0,100	2,66
Farbe 2	27,14	0,0136	7,02	Farbe 15	0,64	0,0022	0,73
Farbe 3	113,52	0,1066	30,81	Farbe 16	1,60	0,0014	1,13
Farbe 4	7,87	0,0034	3,12	Farbe 17	17,46	0,0101	4,99
Farbe 5	9,25	0,0054	3,91	Farbe 18	13,48	0,0166	3,58
Farbe 6	23,72	0,0139	4,81	Farbe 19	13,90	0,0202	2,74
Farbe 7	12,07	0,0089	2,13	Farbe 20	11,19	0,0088	3,66
Farbe 8	8,70	0,0071	1,89	Farbe 21	9,10	0,0181	1,78
Farbe 9	6,10	0,0062	2,05	Farbe 22	10,45	0,0179	1,79
Farbe 10	36,66	0,0787	13,11	Farbe 23	1,19	0,0019	1,13
Farbe 11	4,81	0,0020	2,38	Farbe 24	1,77	0,006	19,46
Farbe 12	9,86	0,0066	4,24	Farbe 25	2,22	0,0027	20,93
Farbe 13	3,49	0,0090	1,85				

Tabelle 5.1: Farbabstände $\Delta E_{L^*a^*b^*}$, $\Delta E_{u'v'}$ und ΔE_{00} der oberen und unteren Displayhälften

stimmung zwischen dem Bild, das auf dem Bildschirm wiedergegeben wird, und der Realität, das heißt der Originalszene, wie es dem Probanden zum Zeitpunkt der Aufnahme des Bildes entsprechen würde. Diese Definition basiert auf der Arbeit von Fedorovskaya et al. (Fedorovskaya et al. 1997). Die Anzeigedauer der Testbilder beträgt zehn Sekunden. Anschließend werden den Probanden drei Knöpfe angezeigt. Der Proband wählt, ob das obere oder das untere Bild natürlicher ist. Der dritte Knopf ist für „keinen Unterschied“. Für die Readaptation des Probanden wird nach jedem Bild ein schwarzes Bild für fünf Sekunden angezeigt.

Optische Vermessung der Testbilder

Die gemessenen Farbabstände werden in der Tabellen 5.1 dargestellt. Es werden die Farbabstände aller Testfarben mit $\Delta E_{L^*a^*b^*}$, $\Delta E_{u'v'}$ und ΔE_{00} aus Kapitel 2.3.3 angegeben.

Die Bereiche von ΔE_{00} in Tabelle 5.1 haben eine große Streuung und reichen von 0,73 bis 30,81. Es kann aufgezeigt werden, dass die Erstellung der Testfarben nach der Methode in Kapitel 4.2 keine identischen Farborte für die beiden Displayhälften erzeugt. Der Farbabstand und daraus folglich der Metamerieindex nach Kapitel 2.2.3 ist groß.

Gruppe	Median Bereich	Beschreibung Farbabstand
1	0 - 19	Übereinstimmung der Farben
2	20 - 39	Unterschied für das geübte Auge
3	40 - 59	Wahrnehmbarer Unterschied
4	60 - 79	Gut wahrnehmbarer Unterschied
5	80 - 100	Deutlicher Unterschied

Tabelle 5.2: Klassifizierung und Gruppierung der Mediane zu den ΔE_{00} -Werten

Statistische Auswertung

Die Antworten der Probandenstudie wird mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung geprüft (Pospeschill 2006). Zur Stabilisierung des Ergebnisses gegenüber Ausreißern wird der Einsatz des Medians anstelle des Mittelwerts bevorzugt (Siebertz et al. 2010). Die VAS mit 100 Werten wird in Gruppen klassifiziert. Die Anzahl der Klassen k wird anhand Formel 5.3 nach Pospeschill berechnet (Pospeschill 2006). Aus $n = 31$ Probanden ergibt sich eine Klassenanzahl von $k = 5$. Tabelle 5.2 stellt die Klassen dar, mit den zugehörigen Wertebereichen der VAS. In der Auswertung werden die gemessenen ΔE_{00} -Werten des Farbabstands der beiden Displayhälften mit den Klassen verglichen.

$$k \geq \frac{\log n}{\log 2} \quad (5.3)$$

Die statistische Auswertung der Testbilder (Farbbilder) wird über die relative Häufigkeit der Antworten zu den jeweiligen Bildern durchgeführt (Maier D. et al. 2017-10-24).

5.1.2 Test auf Reproduzierbarkeit

Die Retest-Reliabilität¹ wird bestimmt durch ein Set von 18 Testfarben. Tabelle B.4 in Anhang listet die RGB-Werte der Testfarben auf. Es werden sechs rote, sechs grüne und sechs blaue Testfarben verwendet. Die Retest-Testfarben mit den Nummern 6, 12 und 18 sind die nach Formel 4.2 berechneten identischen Tristimulus-Werte für Grün, Blau und Rot und werden in der Theorie metamer wahrgenommen. Die restlichen fünf Testfarben für Grün, Blau und Rot sind so gewählt, dass die RGB-Werte bis zum jeweiligen Eckpunkt des RGB-Farbraumwürfels (Abbildung 2.10) linear gleichmäßig verteilt sind (Maier D. et al. 2017-10-24).

¹Retest-Reliabilität ist eine Methode der Psychologie und bezeichnet den Grad der Genauigkeit eines Tests (Berth und Balck 2003). Allgemein wird für einen Test eine Reliabilität größer als 0,8 gefordert (Kaplan und Saccuzzo 2017; Nunnally 1978).

Zwei Probanden aus dem Probandenkollektiv absolvieren den Test der Reliabilität. An drei aufeinander folgenden Tagen jeweils einmal zur selben Uhrzeit führen die Probanden den Test wie in der Durchführung der Probandenstudie beschrieben aus.

Die Retest-Reliabilität wird statistisch mit dem Friedman-Rangsummentest ausgewertet. Grundlage hierfür ist der Vergleich mehrerer verbundener, intervallskalierter, nicht normalverteilter Stichproben. Eine Varianzanalyse ist nicht möglich, da die Messdaten der Retest-Reliabilität nicht normalverteilt sind. Auf Normalverteilung der Messdaten wird mit dem Shapiro-Wilk-Test geprüft (Pospeschill 2006). Die Zurückweisung der Nullhypothese, der Fehler erster Art, wird auf $\alpha = 5\%$ festgelegt (Siebertz et al. 2010).

Ergebnisse der Retest-Reliabilitätsmessung

Die Testfarben der Retest-Reliabilität (Tabelle B.4) werden mittels des Spektralradiometer (C.1.3) vermessen und der Farbabstand ΔE_{00} nach Kapitel 2.3.3 berechnet. Die Nullhypothese H_0 des für den Retest-Reliabilität Friedmann-Rangsummentest ist: Die Messungen zeigen keinen signifikanten Unterschied zueinander. Die alternative Hypothese H_1 ist: Die Messdaten sind zueinander signifikant unterschiedlich.

Die Antworten der Probanden der Retest-Reliabilitätsmessung befinden sich im Anhang in Tabelle B.5. Für die Retest-Reliabilität des ersten Probanden ergibt der Friedmann-Rangsummentest ein Signifikanzniveau von $p = 0,42$. Für den zweiten Probanden ergibt sich ein Signifikanzniveau von $p = 0,22$. Die Signifikanzniveaus der beiden Probanden sind kleiner als der Fehler erster Art $\alpha = 5\%$. Daraus ableitend darf die Nullhypothese H_0 nicht abgelehnt werden. Die Messungen der Retest-Reliabilität weisen keinen signifikanten Unterschied auf. Die verwendete Untersuchungsmethode liefert daraus folgend reproduzierbare Ergebnisse.

5.1.3 Ergebnisse der Farbwahrnehmungsuntersuchung

31 Probanden haben 25 Testfarben unter Verwendung der VAS bewertet und die Natürlichkeit von fünf Testbildern (Farbfotografien) bewertet.

	Median	Gruppe		Median	Gruppe
Farbe 1	71	4	Farbe 14	53	3
Farbe 2	10	1	Farbe 15	66	4
Farbe 3	57	3	Farbe 16	57	3
Farbe 4	18	1	Farbe 17	51	3
Farbe 5	5	1	Farbe 18	48	3
Farbe 6	52	3	Farbe 19	32	2
Farbe 7	59	3	Farbe 20	54	3
Farbe 8	62	4	Farbe 21	16	1
Farbe 9	54	3	Farbe 22	13	1
Farbe 10	64	4	Farbe 23	75	4
Farbe 11	5	1	Farbe 24	79	4
Farbe 12	6	1	Farbe 25	84	5
Farbe 13	59	3			

Tabelle 5.3: Mediane der Ergebnisse für die Testfarben und Eingruppierung in die Unterschiedsklassen nach Tabelle 5.2

Ergebnisse der Testfarben

Tabelle 5.3 stellt die Mediane der Probandenantworten der 25 Testfarben dar. Trotz des teilweise sehr geringen Farbabstandes in der $u'v'$ -Farbebene, dargestellt durch $\Delta E_{u'v'}$, ist der Unterschied bei den helligkeitsabhängigen Farbabständen groß. Der Weißpunkt (Testfarbe 16) mit einem $\Delta E_{u'v'} = 0,0014$ und $\Delta E_{00} = 1,13$ wird im Median mit 57 bewertet. Dieser Wert ist nach Tabelle 5.2 der Gruppe 3 „Wahrnehmbarer Unterschied“ zugeordnet. Abbildung 5.5 zeigt alle Ergebnisse der 31 Probanden in einer Kastengrafik (Box-Whisker-Plot). Die Streuung der subjektiven Messung ist groß.

Der Zusammenhang zwischen den gemessenen Farbabständen ΔE in Tabelle 5.1 und der Klassifizierung ist unabhängig. Abbildung 5.6 zeigt die relative Anzahl der Eingruppierungen der einzelnen Testfarben abhängig von der Farbe an.

Ergebnisse der Testbilder

Fünf Testbilder wurden zur Bewertung der Natürlichkeit der Bildinhalte angezeigt. Abbildung 5.7 stellt die relative Häufigkeit der Antworten der Probanden für jedes Bild dar.

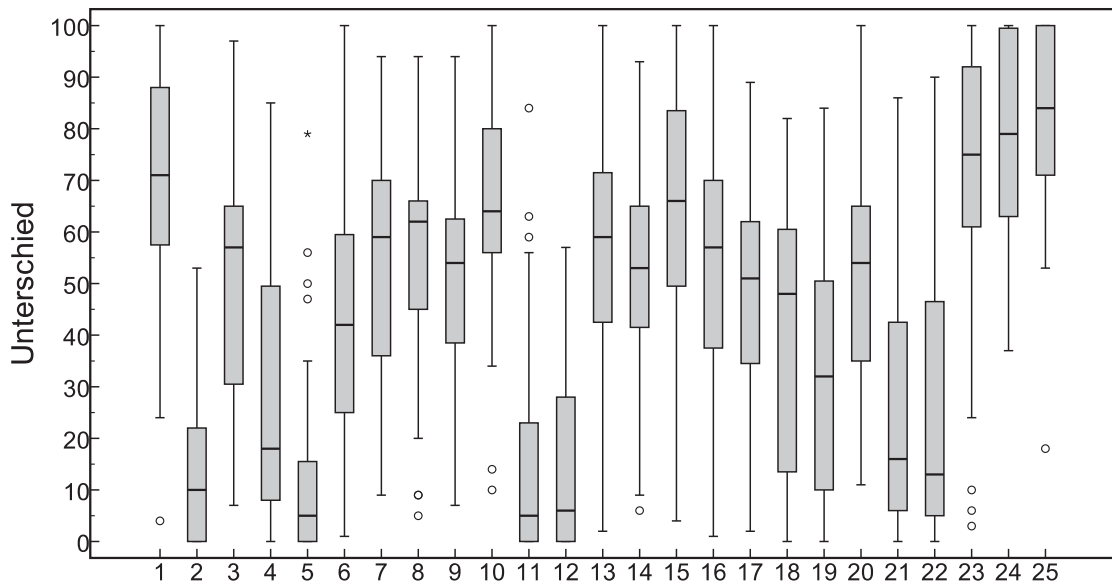


Abbildung 5.5: Kastengrafik aller Ergebnisse der Farbwahrnehmungsuntersuchung

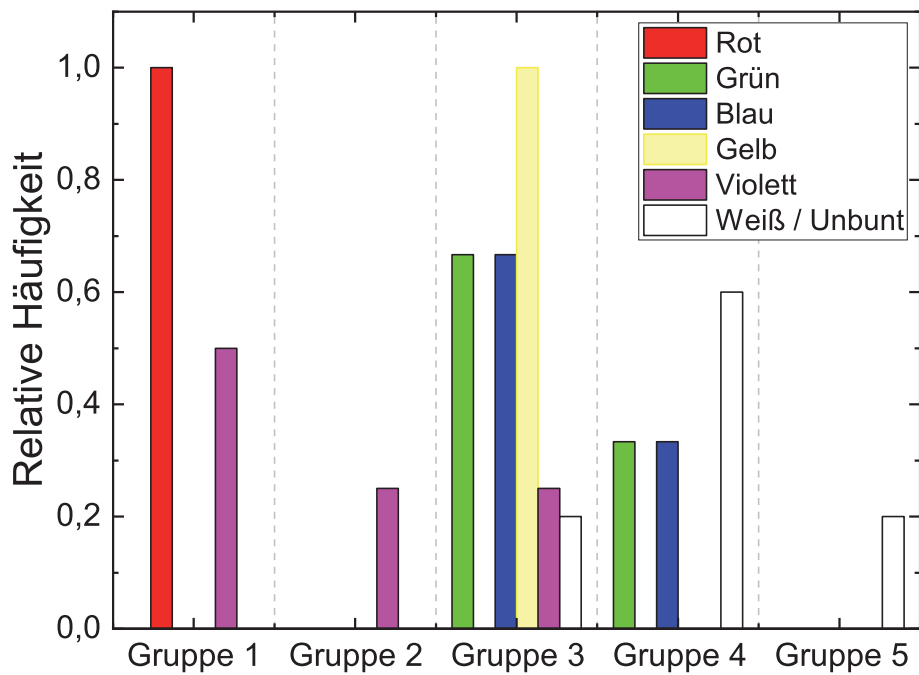


Abbildung 5.6: Zusammenhang zwischen der relativen Häufigkeit der Anzahl der Antworten und der Eingruppierung in die Klassen abhängig von den Farben

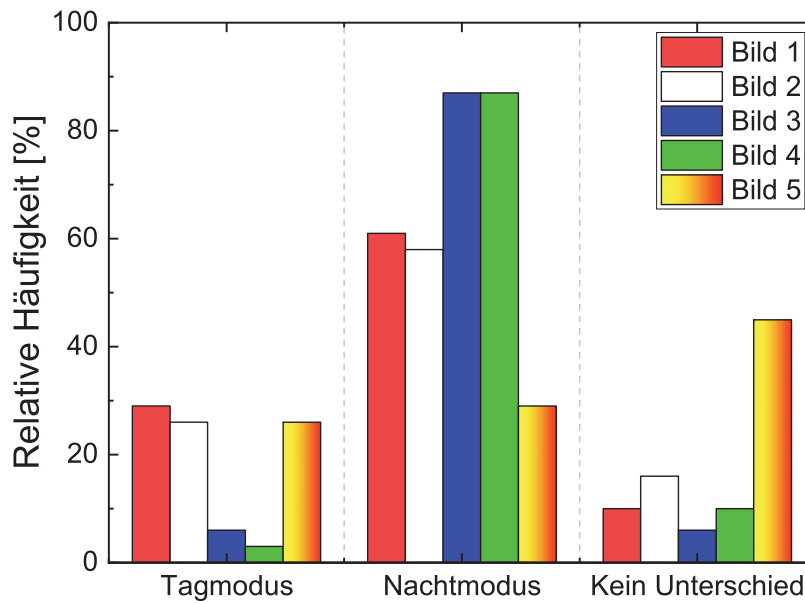


Abbildung 5.7: Relative Häufigkeit der Antworten der fünf Testbilder

Bei Bild 1 wird von 29 % der Probanden der Tagmodus als natürlicher empfunden. 61 % empfinden den Nachtmodus natürlicher und 10 % sehen keinen Unterschied. Bei Bild 2 wird von 26 % der Probanden der Tagmodus als natürlicher empfunden. 58 % empfinden den Nachtmodus natürlicher und 16 % sehen keinen Unterschied. Bei Bild 3 wird von 6 % der Probanden der Tagmodus als natürlicher empfunden. 88 % empfinden den Nachtmodus natürlicher und 6 % sehen keinen Unterschied. Bei Bild 4 wird von 3 % der Probanden der Tagmodus als natürlicher empfunden. 87 % empfinden den Nachtmodus natürlicher und 10 % sehen keinen Unterschied. Bei Bild 5 wird von 26 % der Probanden der Tagmodus als natürlicher empfunden. 29 % empfinden den Nachtmodus natürlicher und 45 % sehen keinen Unterschied.

5.1.4 Diskussion der Ergebnisse der Farbwahrnehmung

Die Messungen der nach der Methode in Kapitel 4.2 erstellten Testfarben zeigen keine metameren Farborte am Prototyp. Die Streuung der Farbabstände ist groß und reicht von $\Delta E_{00} = 0,73$ bis $\Delta E_{00} = 30,81$. Die Begründung hierzu ist auf die Summe von Messfehlern und Interpolationen bei der Charakterisierung des Displays zurückzuführen. Die Farbcharakterisierung basiert auf der Messungen von jeweils 32 Testfarben für Rot, Grün und Blau. Die Zwischenfarben werden daraus interpoliert. Damit die Farbanpassung eine Farbe in eine zweite metamere Farbe umrechnen kann, muss die Farbcharakterisierung präzisere Werte liefern. Beispielsweise sollten die Kanal-Wechselbeziehung zwischen den Farben nach DIN 61966-4 einbezogen werden.

Der Test auf Reproduzierbarkeit der durchgeführten Untersuchung bestätigt die Nullhypothese H_0 , dass kein signifikanter Unterschied in der Wiederholung der Untersuchung vorkommt und sich der Test folglich für die Untersuchung der Farbwahrnehmung eignet.

Die Untersuchung der Testfarben zeigt interindividuelle Unterschiede. Alle Testfarben weisen eine große Streuung auf (Abbildung 5.5). Die Testfarben 1, 2, 5, 10, 11, 12, 23, 24 und 25 zeigen eine deutliche Tendenz zur Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung der wahrgenommenen Farbdifferenz. Bei fünf roten Testfarben (2, 4, 5, 11, 12) wird kein Unterschied erkannt. Obwohl der Farbabstand zwischen $\Delta E_{00} = 2,38$ und $\Delta E_{00} = 7,02$ liegt, werden diese Testfarben als metamer wahrgenommen. Die beiden Testfarben 21 und 22 (Violettfarben) sind mit den Medianen 16 und 13 noch in der Gruppe 1 und werden metamer wahrgenommen. Der gemessene Farbabstand der Testfarben 21 und 22 ist mit $\Delta E_{00} = 1,78$ und $\Delta E_{00} = 1,79$ gering. Testfarbe 19 (Violett) mit einem $\Delta E_{00} = 2,78$ und einem Median der Antworten von 32 ist in Gruppe 2 „Unterschied für das geübte Auge“ eingeordnet. Testfarbe 18 (Violett) mit einem $\Delta E_{00} = 3,58$ und einem Median der Antworten von 42 ist in Gruppe 3 „Wahrnehmbarer Unterschied“ eingeordnet.

Von den grünen Testfarben werden zwei von drei in Gruppe 3 eingestuft. Dies sind die Testfarben 6 ($\Delta E_{00} = 4,81$) und 7 ($\Delta E_{00} = 2,13$). Testfarbe 1, das gesättigte Grün, wird in Gruppe 4 „Gut wahrnehmbarer Unterschied“ mit $\Delta E_{00} = 14,83$ eingestuft. Drei von vier blauen Testfarben (3, 9 und 18) sind in Gruppe 3 mit einem Farbabstand von $\Delta E_{00} = 2,05$, $\Delta E_{00} = 3,58$ und $\Delta E_{00} = 30,81$. Gesättigtes Blau (Testfarbe 3) mit einem $\Delta E_{00} = 30,81$ wird in Gruppe 3 bewertet. Die blaue Testfarbe 10 ($\Delta E_{00} = 13,11$) in Gruppe 4. Zwei von drei Cyan-Testfarben (13 und 14) mit den Farbabständen von $\Delta E_{00} = 1,85$ und $\Delta E_{00} = 2,66$ werden in Gruppe drei eingestuft; die Cyan-Testfarbe 8 ($\Delta E_{00} = 1,89$) in Gruppe 4. Die gelben Testfarben 17 und 20 mit $\Delta E_{00} = 4,99$ und $\Delta E_{00} = 3,66$ sind in Gruppe 3.

Die unbunten Farben zeigen eine Diskrepanz zwischen der Eingruppierung und dem Farbabstand. Gesättigtes Weiß (Testfarbe 16) mit $\Delta E_{00} = 1,13$ wird in Gruppe 3 bewertet. Die Testfarben 15 mit dem geringsten Farbabstand $\Delta E_{00} = 0,75$ wird in Gruppe 4 bewertet. Testfarbe 22 und 24 mit $\Delta E_{00} = 1,13$ und $\Delta E_{00} = 19,46$ ebenfalls in Gruppe 4. Testfarbe 15 mit $\Delta E_{00} = 20,93$ wird in Gruppe 5 „Deutlicher Unterschied“ bewertet.

Die Ergebnisse der Testbilder zeigen abhängig von den Bildinhalten eine natürlichere Bewertung des Nachtmodus als des Tagmodus. Deutlich ist dies bei den beiden Testbildern 3 (See und Berge) und 4 (Blumenwiese) zu sehen. Testbild 3 wird mit 88 % und Testbild 4 mit 87 % der Nachtmodus als natürlicher bewertet. Dies ist auf den hohen Blauanteil in den Bildern zurückzuführen. Die blaue Primärfarbe des Nachtmodus von 450 nm wird deutlich blauer wahr-

genommen als die 470 nm Primärfarbe des Tagmodus. Bei Testbild 1 (Canyon) empfinden 61 % der Probanden den Nachtmodus natürlicher. Bei Testbild 2 (Grashüpfer auf Blume) empfinden 58 % den Nachtmodus natürlicher. Das Testbild 5 (Bundstifte) wird von 45 % der Probanden als gleich natürlich empfunden. Die Wahl des Tagmodus (26 %) zum Nachtmodus (29 %) teilt sich nahezu auf.

Die Ergebnisse der Voruntersuchung zeigen einen nicht linearen Zusammenhang zwischen den gemessenen Farbabständen und den subjektiv wahrgenommenen Farbabständen. Abhängig vom Farbort gibt es eine deutliche Diskrepanz zwischen der Theorie, dass kleine gemessene Farbabstände nicht unterschieden werden können, zu den Ergebnissen dieser Untersuchung. Üblicherweise wird in der Literatur bei Experimenten der Farbwahrnehmung die Lichtquelle einer zu beleuchtenden Oberfläche oder bei Displays die Veränderung der Bildinhalte durch das LCP untersucht, wie im Stand der Forschung und Praxis dargestellt (Kapitel 2.4).

Eine mögliche Erklärung für die Diskrepanz zwischen den gemessenen und wahrgenommenen Farbabständen liefert der „Hunt Effekt“ und der „Helmholtz-Kohlrausch-Effekt“ (vgl. Kapitel 2.2.2). Der Unterschied in der Helligkeit führt bei einem kleinen Farbabstand innerhalb einer Farbebene zu einem wahrnehmbaren Unterschied der Farbsättigung. Der Unterschied der Farbsättigung bei identischer Helligkeit führt zu einem wahrnehmbaren Unterschied der Helligkeit (Fairchild 2013; Hunt 2004; Schanda 2007; Wyszecki und Stiles 2000).

Die Voruntersuchung stellt mit dem direkten Vergleich zweier Bildinhalte ein nicht realitätsnahes Szenario dar. Die Beleuchtungsmethode des metameren Weißpunktes (Kapitel 4.2) basiert auf einem Tagmodus und einem Nachtmodus. Somit gibt es einen zeitlichen Abstand zwischen den beiden zu betrachtenden unterschiedlichen Lichtspektren. Der Übergang zwischen diesen beiden Lichtspektren wird dabei nicht betrachtet. Aus Untersuchungen der Farberinnerung kann nachgewiesen werden, dass ab einem Zeitunterschied von 15 Sekunden der wahrgenommene Farbunterschied zwischen der gesehenen Farbe und der erinnerten Farbe bis zu einem $\Delta E_{ab} = 5$ sein kann (Schanda 2007).

5.2 Wahrgenommene Bildqualität bei variablem Spektrum

Ausgehend von der Voruntersuchung der Farbwahrnehmung wird eine zweite Untersuchung durchgeführt. Ihr Ziel ist die Bewertung der wahrgenommenen Bildqualität mit der Beleuchtungsmethode des metameren Weißpunktes. Die beiden zu überprüfenden Lichtspektren werden mit einer zeitlichen Differenz zwischen den betrachteten Bildinhalten verändert. Dabei sollen sowohl Farbfotografien realistischer Szenen, farbige Grafiken als auch Bildschirmhalte der Wissensarbeit betrachtet werden.

Die Entwicklung der Methode zur Displaybeleuchtung in Kapitel 4 zeigt, dass die Umrechnung der Farben für gesättigte Farben, besonders Blau, keine metameren Farborte erzeugen kann. Bei der Methode des metameren Weißpunktes werden einzig die Farborte des Weißpunktes zwischen den beiden RGB-Kombinationen metamer aufeinander kalibriert.

Die Untersuchung soll analog die wahrgenommene Bildqualität des Display-Prototyps und eines Blaulicht-reduzierten Displays miteinander vergleichen. Hierzu wird zusätzlich ein Büromonitor aus Kapitel 3.2 verwendet und mit der Software f.flux betrieben. Die Fragestellungen dieser vergleichenden Untersuchung zweier Displays lautet:

- Wie wird die Bildqualität in einem Blaulicht-reduzierten Display bewertet?
- Wie wird die Bildqualität in einem Display mit der Methode des metameren Weißpunktes bewertet?
- Bei welchen der beiden Methoden wird die Veränderung der Bildinhalte schwächer bzw. stärker wahrgenommen?

5.2.1 Methode und Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Untersuchung der wahrgenommenen Bildqualität werden zwei Displays verwendet: erstens der CwD-Prototyp, basierend auf dem zweiten Prototyp aus Kapitel 4.3.3; zweitens der Eizo EV2436W Büromonitor (Kapitel 3.2). Beide Displays haben eine identische Diagonale von 24 Zoll und eine Auflösung von 1920 x 1200 Pixel. Die Leuchtdichte beider Displays sowie bei dem CwD beider Lichtspektren wird auf eine annähernd gleiche Leuchtdichte eingestellt.

Der CwD-Prototyp kann auf den Tagmodus oder den Nachtmodus eingestellt werden. Für den Tagmodus wird eine RGB-Kombination folgender LEDs gewählt: 470 *nm* Blau, 520 *nm* Grün

und 620 nm Rot. Die Nachtmodus RGB-Kombination besteht aus 450 nm Royalblau, 550 nm Grün und 670 nm Tiefrot. Im Unterschied zur Voruntersuchung (Kapitel 5.1) wird bei dieser Untersuchung der wahrgenommenen Bildqualität die rote Primärfarbe ebenfalls verändert. Die Begründung hierfür liegt in der Wirkungsfunktion der melanopischen Lichtwirkung nach DIN SPEC 5031-100: Im roten Bereich des Lichtspektrums wird mit steigender Wellenlänge die melanopische Lichtwirkung geringer (Deutsches Institut für Normung e.V. 2015-08-01).

Das Eizo-Display wird ebenfalls mit zwei unterschiedlichen Lichtspektren betrieben: erstens im Standard sRGB-Modus des Displays; zweitens wird die Software f.lux in der Einstellung f.lux 3 400 K verwendet. Die Begründung hierzu folgt aus den Ergebnissen der Farbraumveränderungen in blaulichtreduzierten Displays aus Kapitel 3.2. In der Einstellung f.lux 3 400 K ist der darstellbare Farbraum identisch mit der Standardeinstellung. (<1%) Die Beleuchtungsstärke der gemessenen Displays ist zwischen 29 % und 37 % und der MDEI zwischen 55 % und 60 % geringer als in der Standardeinstellung. Der $a_{mel,v}$ ist zwischen 33 % und 37 % geringer. In der Einstellung f.lux 2 700 K sowie bei kleineren Farbtemperaturen sinkt die Beleuchtungsstärke etwa auf die Hälfte der Standardeinstellung. Für die Untersuchung der wahrgenommenen Bildqualität weicht dieser Werte deutlich von den weiteren zu untersuchenden Szenarien ab. Mit dem CwD-Prototyp und dem Eizo-Display werden jeweils zwei Szenarien untersucht. Dies ergibt die folgenden vier Untersuchungsszenarien:

1. CwD – Tagmodus: Das maximal zirkadian wirksame Spektrum
2. CwD – Nachtmodus: Das minimal zirkadian wirksame Spektrum
3. Eizo EV2436W – Standard sRGB-Farbraum
4. Eizo EV2436W – f.lux 3 400 K

Tabelle 5.4 listet die Farborte der Weißpunkte, Tristimuluswerte und Leuchtdichten der vier Untersuchungsszenarien auf. Abbildung 5.8 stellt die Spektren der Weißpunkte und die Farbräume des CwD-Prototyps da. In Kapitel 4.3.4 sind die Farborte des Tag- und Nachtmodus näher aneinander. Für die Probandenstudie wurde die Leuchtdichte reduziert, damit diese an beiden untersuchten Displays möglichst identisch ist. Der Farbabstand zwischen den beiden Weißpunkten des Tag- und Nachtmodus ist $\Delta E_{00} = 4,52$, der Metamerieindex ist $M_{ilm} = 4,74$. Abbildung 5.9 zeigt die Spektren der Weißpunkte und die Farbräume des Eizo-Displays. Der Farbabstand zwischen den beiden Weißpunkten des Eizo-Displays ist $\Delta E_{00} = 46,82$, der Metamerieindex ist $M_{ilm} = 65,5$.

Display	CwD-Prototyp		Eizo EV2436W	
Modus	Tagmodus	Nachtmodus	Standard sRGB	f.lux 3 400
u'	0,2015	0,2003	0,1983	0,2389
v'	0,4693	0,4725	0,4642	0,5131
X	286,11	287,78	272,00	182,60
Y	296,14	301,70	282,97	174,29
Z	316,96	311,14	323,42	86,80
$L_V [cd/m^2]$	296,14	301,70	282,97	174,29

Tabelle 5.4: Gemessene Farborte der Weißpunkte, Tristimuluswerte und Leuchtdichten des CwD-Prototyps und Eizo-Displays

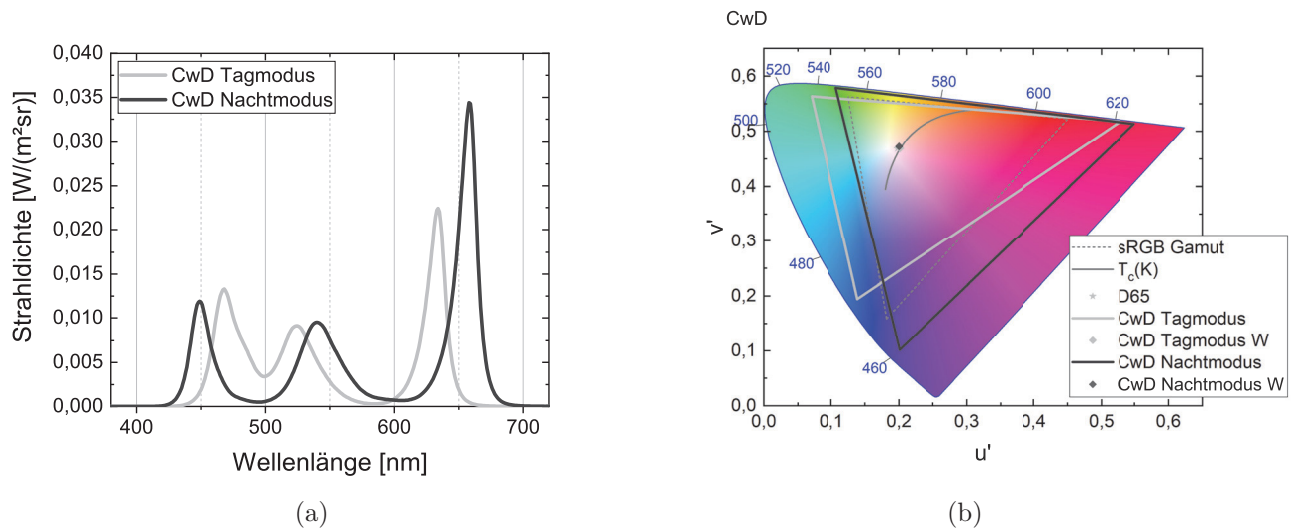


Abbildung 5.8: Spektrum des CwD (a) und Farbraum des CwD (b)

Bildinhalte für Probandenstudie

Angelehnt an die Experimente von Fedorovskaya et al. und Sakurai et al. wird eine Untersuchung der wahrgenommenen Bildqualität durchgeführt (Fedorovskaya et al. 1997; Sakurai et al. 2008). Sakurai et al. wählen ein Set an Bildern aus, die jeweils eines oder mehrere der folgenden Kriterien erfüllen: ein hoher Grad an Farbigeit über einen großen Farbtonbereich, ein hoher Gesamtkontrast, eine geringe Farbigeit mit geringem Gesamtkontrast und menschliche Hauttöne. Ergänzt werden Bilder typischer Situationen der Wissensarbeit, also Bilder täglicher Büroarbeiten. Abbildung 5.10(a–w) zeigen die 24 Testbilder der Untersuchung. Abbildung 5.10(x) ist das Demonstrationsbild, dargestellt zu Beginn der Untersuchung als Beispiel.

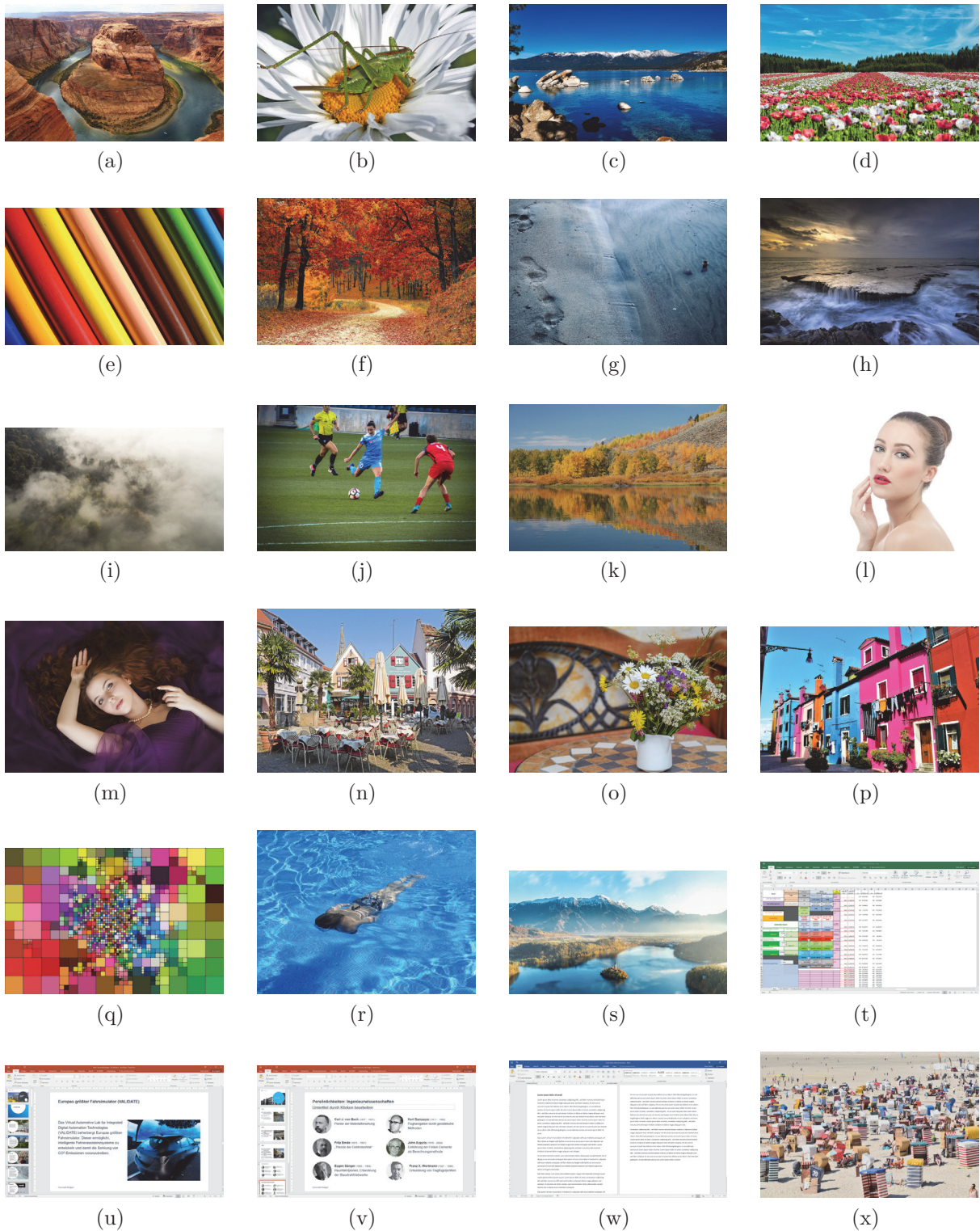


Abbildung 5.10: Testbilder zur Untersuchung der wahrgenommenen Bildqualität (Bildnachweise in Anhang D.2)



Abbildung 5.11: Versuchsaufbau zur Bewertung der wahrgenommenen Bildqualität

Durchführung der Probandenstudie

Der CwD-Prototyp, das Eizo-Display und die Raumbelichtung werden mindestens eine Stunde vor Versuchsbeginn eingeschaltet. Dies gewährleistet die Betriebstemperatur aller Komponenten und eine Minimierung temperaturabhängiger Farbveränderungen der Displays und der Leuchten. Der Proband nimmt auf dem Stuhl vor dem Display Platz und liest die Datenschutzerklärung sowie die Probandenaufklärung durch. Der Studienleiter befragt den Probanden anhand des Anamnesebogens und füllt diesen aus. Zur Überprüfung der Farbtüchtigkeit des Probanden wird der verkürzte Ishiharatest dargeboten (Ishihara 1972). Die Höhe des Tisches mit den Displays wird so eingestellt, dass die Oberkante des Displays auf Augenhöhe des Probanden ist. Der Abstand der Augen des Probanden zum Display beträgt 70 cm . Sind keine Ausschlusskriterien gefunden, startet der Test nach Versuchsprotokoll.

Vier Untersuchungsszenarien werden in randomisierter Reihenfolge anhand des Versuchsprotokolls (Tabelle 5.5) durchgeführt. Die Randomisierung wurde in zwei Stufen erstellt. Erstens wurde die Reihenfolge zwischen den beiden Displays, dem CwD-Prototyp und dem Eizo randomisiert. Aufgrund der Funktionsweise des Testprogramms muss zwischen den beiden Untersuchungen das Bildsignalkabel am PC umgesteckt werden. Zur Optimierung des Versuchsablaufes werden mit dem startenden Display beide Szenarien untersucht, bevor das Display gewechselt wird. Ferner wurde die Reihenfolge der zu untersuchenden Szenarien an einem Display randomisiert. Die Bedingung der Randomisierung war: Jedes Untersuchungsszenario kommt gleich häufig an erster, zweiter, dritter und vierter Stelle.

Studie	CwD-Prototyp		Eizo EV2436W	
	Tagmodus	Nachtmodus	Standard	f.lux 3 400 K
P001	2.	1.	3.	4.
P002	1.	2.	4.	3.
P003	2.	1.	4.	3.
P004	1.	2.	3.	4.
P005	2.	1.	3.	4.
P006	3.	4.	2.	1.
P007	1.	2.	4.	3.
P008	4.	3.	1.	2.
P009	3.	4.	2.	1.
P010	4.	3.	2.	1.
P011	3.	4.	1.	2.
P012	4.	3.	2.	1.
P013	1.	2.	4.	3.
P014	3.	4.	2.	1.
P015	2.	1.	4.	3.
P016	1.	2.	3.	4.
P017	2.	1.	3.	4.
P018	1.	2.	3.	4.
P019	4.	3.	1.	2.
P020	1.	2.	4.	3.
P021	4.	3.	2.	1.
P022	3.	4.	1.	2.
P023	4.	3.	1.	2.
P024	2.	1.	4.	3.
P025	3.	4.	1.	2.
P026	4.	3.	1.	2.
P027	3.	4.	2.	1.
P028	2.	1.	3.	4.

Tabelle 5.5: Versuchsprotokoll der Probandenstudie: Reihenfolge der Szenarien

Zu Beginn jedes Untersuchungsszenario schließt der Versuchsleiter den nach dem Versuchsprotokoll ersten Monitor an den PC an, stellt das richtige Spektrum der Displaybeleuchtung ein und startet das Testprogramm. Das Testprogramm wählt randomisiert eines der 24 Testbilder aus und stellt jeweils ein Testbild vollflächig für drei Sekunden auf dem Display dar. Die Anzeigedauer von drei Sekunden dient der Verhinderung von Farb- und Helligkeitsadaptationen des Auges. Im Anschluss an die Testfarben werden dem Probanden drei Schieberegler mit

einer VAS angezeigt. Der Proband soll das gesehene Bild anhand dreier Bewertungskriterien bewerten: **Qualität**, **Farbsättigung** und **Natürlichkeit**. Die Einteilung der horizontalen Schieberegler geht jeweils von „geringe ...“ auf der linken Seite bis „hohe ...“ auf der rechten Seite. Die zugeordneten numerischen Werte sind für „geringe ...“ 0 und für „hohe ...“ 100. Dies wiederholt sich bis der Proband die vier Untersuchungsszenarien absolviert hat.

Die Probandenaufklärung informiert die Probanden über das Verständnis der Bewertungskriterien mit folgendem Wortlaut:

- „**Qualität** meint die wahrnehmbare Bildqualität und ist definiert als der Grad der Exzellenz des Bildes.“
- „Die **Farbsättigung** beschreibt Ihre wahrgenommene Qualität der Farbwirkung.“
- „**Natürlichkeit** ist definiert als der Grad der Übereinstimmung zwischen dem Bild, das auf dem Bildschirm wiedergegeben wird, und der Realität, das heißt der Originalszene, wie Ihnen zum Zeitpunkt der Aufnahme des Bildes entspricht.“

Die Bewertungskriterien sind angelehnt an die Untersuchung von Fedorovskaya et al. und Sakurai et al. (Fedorovskaya et al. 1997; Sakurai et al. 2008). Die Probanden des Experiments von Sakurai et al. wurden gebeten, die relative Farbigkeit, das wahrgenommene Farbraumvolumen, den Helligkeitskontrast und die Farbsättigung der dargestellten Bilder zu bewerten (Sakurai et al. 2008). Fedorovskaya et al. ließen Probanden Bilder auf einem Display anhand deren erlebter Natürlichkeit, der Farbigkeit und der Qualität bewerten. Die Autoren argumentierten, dass die Beurteilung der wahrgenommenen Bildqualität einem Vergleich zwischen dem Ausgangssignal des visuellen Prozesses und eine interne Referenz, eine Gedächtnisrepräsentation entspricht. Natürlichkeit beschreibt dabei die Vorstellungen und Erwartungen der Beobachter (Fedorovskaya et al. 1997). Die Übertragung der verwendeten Begrifflichkeit der Natürlichkeit auf die dargestellten Bildinhalte der Wissensarbeit sollen die Probanden folgendermaßen umsetzen: Natürlichkeit eines Bildinhaltes einspricht den eigenen Erwartungen an das Bild. Die Ergebnisse hängen von der Erfahrung der Probanden ab.

Statistische Auswertung

Die Antworten der Probanden werden mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung geprüft (Pospeschill 2006). Mithilfe einer multivariaten Varianzanalyse (MANOVA) werden die Daten analysiert. Der Post-Hoc-Test zur Bestimmung der Signifikanzniveaus wird mit Hilfe der Bonferroni-Korrektur angepasst. In einer mehrfaktoriellen Analyse können die Testergebnisse voneinander abhängig sein oder nicht. Ein unkorrigierter α -Wert kann dabei zu falschen sta-

tistischen Entscheidungen führen. Die Bonferroni-Korrektur justiert das Niveau des α -Fehlers (Bortz 2008). Hierbei muss kritisch angemerkt werden, dass mit dieser Methode der Fehler erster Ordnung (α -Fehler) sinkt, der Fehler zweiter Ordnung (β -Fehler) steigt. Armstrong weist bei der Analyse ophthalmologischer Studien auf diesen Einfluss hin (Armstrong 2014). Mit der MANOVA können zwei oder mehr abhängige Variablen miteinander verglichen werden. Ebenfalls kann mit einer MANOVA die Beziehung zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen untersucht werden. Im Unterschied zur Voruntersuchung in Kapitel 5.1.1 wird in diesem Fall eine Varianzanalyse (multivariat) verwendet, obwohl die Daten nicht normalverteilt sind.

Die Nullhypothese H_0 für die Untersuchung ist: Zwischen zwei Szenarien auf einem Display ist kein signifikanter Unterschied.

Die alternative Hypothese H_1 ist: Zwischen zwei Szenarien auf einem Display ist ein signifikanter Unterschied. Der Fehler erster Art wird auf $\alpha = 5\%$ festgelegt.

5.2.2 Ergebnisse der wahrgenommenen Bildqualität

Die Untersuchung beinhaltet vier Untersuchungsszenarien mit jeweils drei unabhängigen Variablen (Qualität, Sättigung und Natürlichkeit), die allesamt nicht normalverteilt sind (Shapiro-Wilk-Test: $p < 0,001$). Gegenstand der Untersuchung ist der Unterschied zwischen den jeweiligen unabhängigen Variablen innerhalb zweier Szenarien der beiden betrachteten Displays. Ein Bonferroni-korrigierter post-hoc Test zeigt folgende Ergebnisse:

- CwD – Nachtmodus zu Tagmodus zeigt **keinen signifikanten** Unterschied der Qualität ($p = 0,999$) (1,09, 95 % - CI[-1,68, 3,86]).
- CwD – Nachtmodus zu Tagmodus zeigt **keinen signifikanten** Unterschied der Sättigung ($p = 0,999$) (-0,31, 95 % - CI[-2,90, 2,28]).
- CwD – Nachtmodus zu Tagmodus zeigt **keinen signifikanten** Unterschied der Natürlichkeit ($p = 0,999$) (3,24, 95 % - CI[-0,12, 6,60]).
- Eizo – Standard sRGB zu f.lux 3 400 K zeigt **signifikanten** Unterschied der Qualität ($p < 0,001$) (5,21, 95 % - CI[2,44, 7,98]).
- Eizo – Standard sRGB zu f.lux 3 400 K zeigt **signifikanten** Unterschied der Sättigung ($p < 0,001$) (3,79, 95 % - CI[1,20, 6,38]).
- Eizo – Standard sRGB zu f.lux 3 400 K zeigt **signifikanten** Unterschied der Natürlichkeit ($p < 0,001$) (4,80, 95 % - CI[1,43, 8,16]).

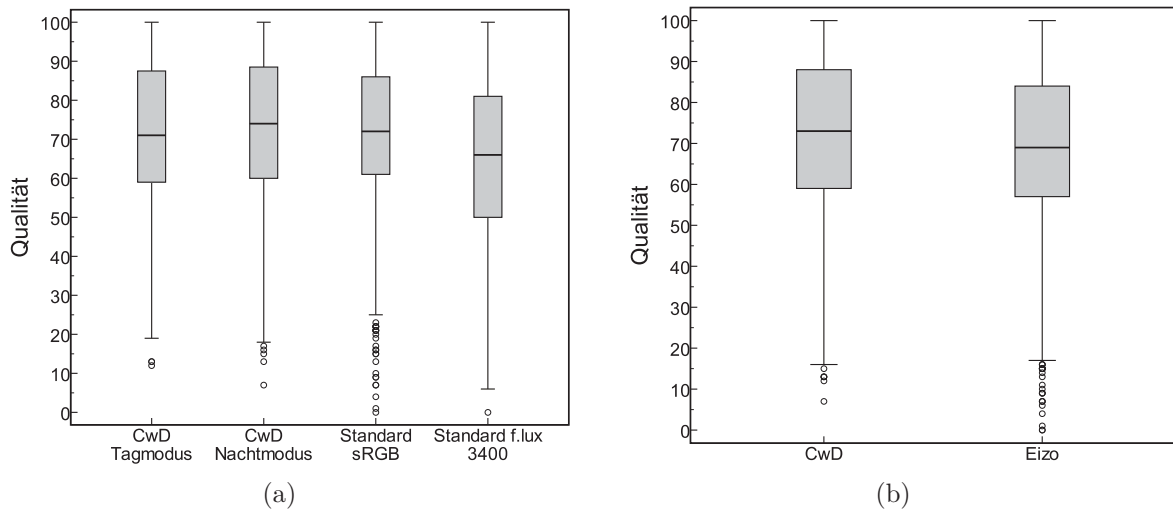


Abbildung 5.12: Ergebnisse der Qualitätsbewertung der Szenarien (a) und der Displays (b)

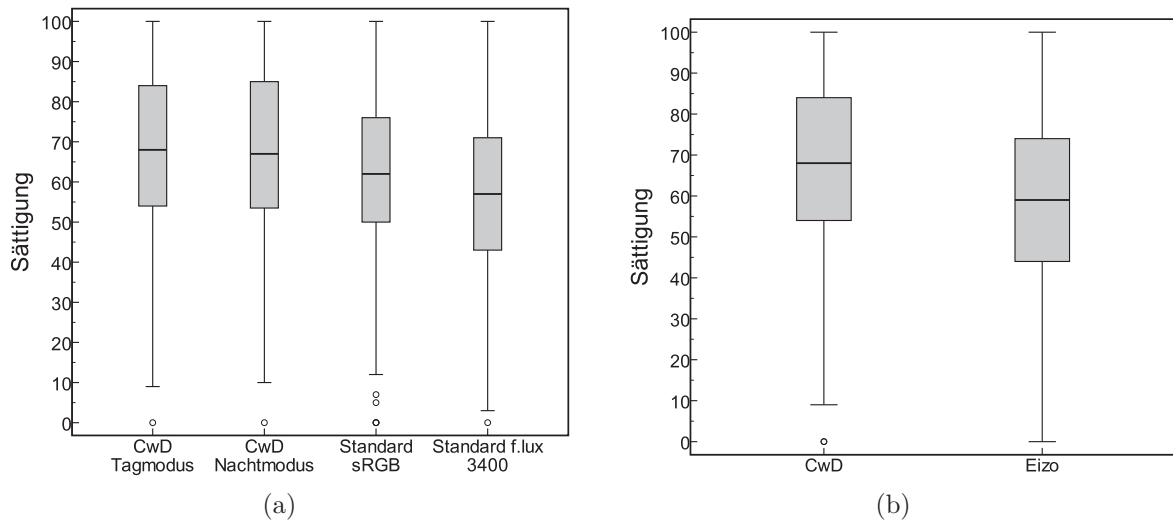


Abbildung 5.13: Ergebnisse der Sättigungsbewertung der Szenarien (a) und der Displays (b)

Abbildung 5.12 zeigt die Kastengrafiken der Qualitätsbewertungen der Szenarien (a) und der Displays (b). Abbildung 5.13 zeigt die Sättigungsbewertungen und Abbildung 5.14 die Natürlichkeitsbewertungen der Szenarien und Displays.

5.2.3 Diskussion zur wahrgenommene Bildqualität

Die Ergebnisse der Untersuchung der wahrgenommene Bildqualität zeigen einen signifikante Unterschied der Variablen Qualität, Sättigung und Natürlichkeit zwischen der Standardeinstellung des Eizo-Monitors und der Nutzung der f.lux Software. Zwischen dem Tag- und Nachtmodus des CwD-Prototyps ist keine Signifikanz in den drei Variablen vorhanden. In der Tendenz wer-

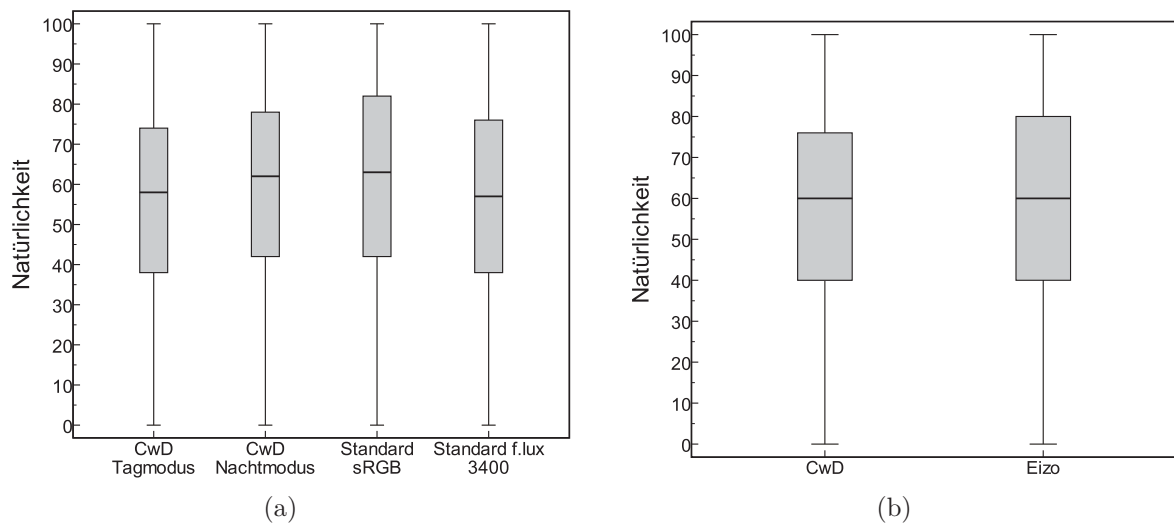


Abbildung 5.14: Ergebnisse der Natürlichkeitsbewertung der Szenarien (a) und der Displays (b)

den die Bildinhalte des Nachtmodus besser bewertet als die im Tagmodus. Dies ist wie in der Voruntersuchung (Kapitel 5.1.4) vermutlich auf das intensivere Blau des Nachtmodus (450 nm) im Vergleich zum Tagmodus (470 nm) zurückzuführen. Aufgrund der Randomisierung der Reihenfolge der Szenarien wird folgende Annahme getroffen: Es gibt keinen Effekt der Reihenfolge bzw. falls es einen Effekt geben sollte, wird dieser durch die Randomisierung ausgeglichen. Der Effekt der Reihenfolge wurde nicht ausgewertet.

Die Fragestellung der Untersuchung lautet: Bei welchen der beiden Methoden – Blaulichtreduzierung oder Methode des metameren Weißpunktes – wird die Veränderung der Bildinhalte schwächer bzw. stärker wahrgenommen? Die zusammenfassende Antwort ist: Bei der Methode der Blaulichtreduzierung wird die wahrgenommene Bildqualität zwischen den beiden Modi Standard-sRGB und f.lux 3400 K von den Probanden signifikant wahrgenommen. Bei der Methode des metameren Weißpunktes wird die wahrgenommene Bildqualität zwischen dem Tag- und Nachtmodus von den Probanden signifikant nicht unterschieden. Eine Tendenz hin zum Nachtmodus ist jedoch zu erkennen.

5.3 Nicht-visuelle Lichtwirkung des Displayprototyps

In diesem Abschnitt werden folgende Fragestellungen diskutiert:

- Haben metamere Farbeindrücke in Displays eine unterschiedliche physiologische Wirkung?
- Kann ein Displaysystem realisiert werden, bei dem sich der visuelle Eindruck der angezeigten Bildinhalte nicht verändert, die Wirkung des Lichts auf den Menschen jedoch veränderbar ist?

Allen et al. zeigen die Unabhängigkeit der Melatoninunterdrückung von dem visuellen Eindruck der Bildinhalte. Die Autoren zeigen auf, dass bei der Betrachtung zweier metamerer Projektionssysteme bei identischer photopischer Beleuchtungsstärke am Auge die Melatoninunterdrückung signifikant unterschiedlich ist. Die melanopische Beleuchtungsstärke ist mit 24,7 zu 77,7 melanopischen Lux etwa 68,2% geringer (Allen et al. 2018). Souman et al. zeigen auf, dass bei identischer Beleuchtungsstärke am Auge mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung und daraus folgend eine unterschiedlich zirkadiane Bewertung der Lichtquelle, die Melatoninunterdrückung sich signifikant ändert (Souman et al. 2018).

5.3.1 Ergebnisse der nicht-visuellen Lichtwirkung

Tabelle 5.6 stellt die nicht-visuellen Messungen des CwD-Prototyps und Tabelle 5.7 die des Eizo-Displays aus der Untersuchung der wahrgenommenen Bildqualität aus Kapitel 5.2 dar. Die spektralen Messungen am Auge wurden in 70 cm Abstand gemessen, wie in Anhang C.2 beschrieben.

5.3.2 Diskussion zur nicht-visuellen Lichtwirkung des CwD

Die Ergebnisse der nicht-visuellen Bewertung des CwD-Prototyps zeigen den Unterschied der Methode des metameren Weißpunktes im Vergleich zur Methode der Blaulichtreduzierung. Der melanopische Wirkungsfaktor des CwD-Tagmodus ist mit $a_{mel,v} = 1,15$ größer als der Wirkungsfaktor des Standardmodus des Eizo-Displays mit $a_{mel,v} = 0,782$. Der melanopische Wirkungsfaktor des CwD-Tagmodus ist größer als der Wirkungsfaktor des Tageslichts mit 8000 K ($a_{mel,v} = 1,009$). Der Standardmodus des Eizo-Displays entspricht etwa der Lichtart D50 ($a_{mel,v} = 0,768$) oder dem einer weißen LED mit 6500 K ($a_{mel,v} = 0,725$). In beiden Methoden ist eine Aktivierung des zirkadianen Systems zu erwarten (vgl. Kapitel 2.5.4).

Display	CwD-Prototyp		Änderung (Nachtm./Tagm.)
	Tagmodus	Nachtmodus	
Modus			
Beleuchtungsstärke [lx]	64,49	64,73	-
Leuchtdichte [cd/m^2]	296,15	301,70	-
Farbtemperatur [K]	6 212	6 121	-
$a_{mel,v}$	1,150	0,663	57,65 %
$E_{V,mel,D65}$ (MDEI) [lx]	81,84	47,34	57,84 %
$E_{e,z}$ (Melanopic) [$\mu W/cm^2$]	10,86	6,28	57,83 %
$E_{e,lc}$ (Erythropic) [$\mu W/cm^2$]	11,50	10,54	91,65 %
$E_{e,mc}$ (Chloropic) [$\mu W/cm^2$]	11,10	9,62	86,67 %
$E_{e,sc}$ (Cyanopic) [$\mu W/cm^2$]	3,80	4,64	122,1 %
$E_{e,r}$ (Rhodopic) [$\mu W/cm^2$]	11,99	8,39	69,97 %

Tabelle 5.6: Nicht-visuelle Bewertung des CwD-Prototyps

Display	Eizo EV2436W		Änderung (f.lux/Std.)
	Standard sRGB	f.lux 3 400 K	
Modus			
Beleuchtungsstärke [lx]	69,95	42,78	61,15 %
Leuchtdichte [cd/m^2]	282,97	174,29	-
Farbtemperatur [K]	6 037	3 263	-
$a_{mel,v}$	0,782	0,515	65,86 %
$E_{V,mel,D65}$ (MDEI) [lx]	60,34	24,29	40,26 %
$E_{e,z}$ (Melanopic) [$\mu W/cm^2$]	8,00	3,22	40,25 %
$E_{e,lc}$ (Erythropic) [$\mu W/cm^2$]	11,60	7,31	63,02 %
$E_{e,mc}$ (Chloropic) [$\mu W/cm^2$]	11,15	5,94	53,27 %
$E_{e,sc}$ (Cyanopic) [$\mu W/cm^2$]	5,01	1,34	26,75 %
$E_{e,r}$ (Rhodopic) [$\mu W/cm^2$]	9,85	4,39	44,57 %

Tabelle 5.7: Nicht-visuelle Bewertung des Eizo EV2436W inklusive f.lux 3 400 K

Bei der Methode des metameren Weißpunktes entspricht die melanopisch bewertete Beleuchtungsstärke am Tag einem größeren Tageslichtäquivalent und ist daher zu bevorzugen.

Der CwD-Nachtmodus ist mit $a_{mel,v} = 0,663$ größer als das Eizo-Display mit der Software f.lux 3 400 K mit einem Wirkungsfaktor von $a_{mel,v} = 0,515$. Der CwD-Nachtmodus entspricht etwa einer weißen LED mit 4 250 K ($a_{mel,v} = 0,669$); die Software f.lux 3 400 K etwa einer weißen LED mit 3 600 K ($a_{mel,v} = 0,513$).

Display	CwD-Prototyp		
Modus	Tagmodus	Nachtmodus	(Nachtmodus 430)
Beleuchtungsstärke [lx]	100	100	100
Leuchtdichte [cd/m^2]	312,23	312,69	312,06
Farbtemperatur [K]	6 520	6 544	6 537
$a_{mel,v}$	1,150	0,663	0,567
$E_{V,mel,D65}$ (MDEI) [lx]	126,9	73,13	67,61
$E_{e,z}$ (Melanopic) [$\mu W/cm^2$]	16,83	9,7	8,97
$E_{e,lc}$ (Erythropic) [$\mu W/cm^2$]	17,83	16,29	17,49
$E_{e,mc}$ (Chloropic) [$\mu W/cm^2$]	17,21	14,86	15,48
$E_{e,sc}$ (Cyanopic) [$\mu W/cm^2$]	5,89	7,16	7,53
$E_{e,r}$ (Rhodopic) [$\mu W/cm^2$]	18,60	12,96	12,97

Tabelle 5.8: Nicht-visuelle Bewertung des CwD-Prototyps mit Nachtmodus 430 nm

Wird der in Kapitel 4.3.4 gezeigte „Nachtmodus 430 nm“ mit einer 430 nm violetten anstatt der 450 nm royalblauen LED verwendet, ergibt sich ein melanopischer Wirkungsfaktor $a_{mel,v} = 0,567$ anstatt $a_{mel,v} = 0,663$. Dieser Wert nähert sich dem melanopischen Wirkungsfaktor $a_{mel,v} = 0,515$ der f.lux Software an. Es muss hierbei erwähnt werden, dass bei einer 430 nm-LED der Farbeindruck blauer Bildinhalte in den Violettbereich verschoben wird. Die Auswirkungen auf die Farbwahrnehmung der Bildschirminhalte müssen dabei gesondert untersucht werden.

5.4 Ergebnisse der Evaluierung

Die Ergebnisse der Evaluierung zeigen, dass im direkten Vergleich zweier Bildinhalte mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung trotz eines geringen Farbabstandes abhängig von der Farbe ein Unterschied wahrnehmbar ist. Besonders bei weißen und unbunten Farben ist dies zu beobachten. Der Unterschied der gemessenen Weißpunkt des Tag- und Nachtmodus haben in der Probandenstudie 1 einen Farbabstand von $\Delta E_{00} = 1,13$. Die Probanden klassifizieren den subjektiv wahrnehmbaren Unterschied des Weißpunktes in Gruppe 3 (wahrnehmbarer Unterschied).

Durch eine zeitliche Differenz bei der Betrachtung zweier Bildinhalte verringert sich der Unterschied des wahrgenommenen Farbabstandes. Die Methode des metameren Weißpunktes zeigt

keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,999$) in der wahrgenommenen Bildqualität. Bei der Methode der Blaulichtreduzierung ist ein Unterschied signifikant wahrnehmbar ($p < 0,001$). Die in der Methodenentwicklung (Kapitel 4.2) aufgestellte Hypothese, dass durch einen zeitlichen Abstand zwischen dem Tag- und Nachtmodus ein größerer Farbabstand von den Nutzern nicht wahrnehmbar ist, kann durch die Probandenstudie 2 bestätigt werden. Hinsichtlich der Wahrnehmung ist die in dieser Arbeit entwickelte Methode des metameren Weißpunktes der Methode der Reduzierung der Blaulichtanteile vorzuziehen.

Die nicht-visuelle Bewertung der Methode des metameren Weißpunktes am Tag hat einen höheren melanopischen Wirkungsfaktor als die Methode Reduzierung der Blaulichtanteile. In der Nacht kann mit der Methode Reduzierung der Blaulichtanteile ein geringerer melanopischer Wirkungsfaktor als mit der Methode des metameren Weisspunktes erreicht werden. Dabei wird jedoch der Weißpunkt deutlich wahrnehmbar in Richtung wärmerer Lichtfarben verschoben.

6 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung einer Methode zur Displaybeleuchtung, welche die zirkadianen Einflüsse von Displays auf den Menschen, besonders die negativen Einflüsse der Displaybeleuchtung auf die Melatoninunterdrückung und die Schlafqualität, minimieren soll. Es wurde die Fragestellung behandelt, welche Einflüsse spektrale Veränderungen der Displaybeleuchtung auf die nicht-visuellen Lichtwirkungen und die Farbwahrnehmung beim Menschen haben.

6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zur Bewertung der nicht-visuellen Lichtwirkung von Displays ist die Bewertungsmethode nach DIN SPEC 5031-100 geeignet. Experiment 1 in Kapitel 3.1 zeigt, dass bei der Anwendung der Bewertungsmethode auf die IAO-UPK-Studie (Cajochen et al. 2011) die Melatoninsuppression anhand des Lichtspektrums der Displaybeleuchtung hinreichend genau vorhergesagt werden kann.

Experiment 2 (Kapitel 3.2) verdeutlicht die Verschiebung des Weißpunktes bei der Methode der Blaulichtreduktion hin zu wärmeren Lichtfarben. Die Verwendung der f.lux Software hat eine Verschiebung der angezeigten Bildfarben zur Folge. Die subjektive Betrachtung der Bildinhalte zeigt einen orangenen Schleier über den Bildinhalten.

Der Anteil der Displaybeleuchtung an der Gesamtbeleuchtung wird in Experiment 3 (Kapitel 3.3) untersucht. Der Anteil der Displaybeleuchtung ist abhängig von der Helligkeit, des Abstandes und der Größe der Displayfläche. In den gemessenen Bürosituationen war der photopische Anteil des Displaylichts bis zu 21 % der Gesamtbeleuchtung am Auge. Der melanopisch bewertete Anteil war bis zu 26 %. Ohne Tageslicht, nur mit künstlicher Raumbeleuchtung stieg der Anteil des Displaylichts in einem gemessenen Büro auf 35 % photopisch und 46 % melanopisch.

Die Schädigung durch blaues Licht von Displaysystemen wurde in Experiment 4 in Kapitel 3.4 untersucht. Die gemessenen Büromonitore waren allesamt um den Faktor 300 geringer als der Grenzwert der Blaulicht-gewichteten Strahldichte von $100 W/m^2 sr$ aus der Norm DIN EN 62471. Displays haben im Vergleich zum Tageslicht eine vielfach geringere Energie des blauen Lichts. Die Wahrscheinlichkeit retinaler Schädigungen durch Displays wird durch die Bewertung mit bekannten Normen und Grenzwert als gering angenommen.

Die in Kapitel 3 gestellten Forschungsfragen:

- Welche Eigenschaften und welche spektrale Zusammensetzung muss ein Display zur Unterstützung des menschlichen Tag-Nacht-Rhythmus haben?
- Wie werden die Bildinhalte eines Displays wahrgenommen, wenn sich die spektrale Zusammensetzung der Displayhintergrundbeleuchtung ändert?

Können zusammenfassend wie folgt beantwortet werden:

Zur Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems sollte das ausgestrahlte Lichtspektrum von Displays am Tag unterschiedlich sein zum Lichtspektrum der Nacht. Das Lichtspektrum am Tag dient der maximalen Anregung des nicht-visuellen Systems. Folglich sollte der melanopische Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$ groß sein. Die Anforderungen an das Lichtspektrum für die Nacht ist die Vermeidung einer Aktivierung des nicht-visuellen Systems. Die bedeutet ein möglichst geringer melanopischer Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$.

Das wesentliche Ergebnis dieser Arbeit ist: Sowohl die Methode der Blaulichtreduzierung als auch die entwickelte Methode des metameren Weißpunktes eignen sich zur Unterstützung des menschlichen zirkadianen Systems. Mit der Methode der Blaulichtreduzierung kann der melanopische Wirkungsfaktor, beispielsweise mit der Software f.lux in der Einstellung 1900K, auf bis zu $a_{mel,v} = 0,248$ reduziert werden. Die Bildinhalte zeigen jedoch eine deutlich wahrnehmbare orangene Verfärbung und eine relative Verkleinerung des Farbraumes um 30 % (vgl. Kapitel 3.2.2). Mit der Einstellung f.lux 3400 K ist der darstellbare relative Farbraum 99,5 % des Farbraumes im Standardmodus und der melanopische Wirkungsfaktor ist abhängig vom Display etwa $a_{mel,v} = 0,515$. Die Verschiebung des Weißpunktes und weiterer Farben ist subjektiv wahrnehmbar.

Die entwickelte Methode des metameren Weißpunktes zeigt am Tag einen größeren melanopischen Wirkungsfaktor ($a_{mel,v} = 1,15$; entspricht einer weißen LED mit 8000 K) als ein Standarddisplay ($a_{mel,v} = 0,782$). In der Nacht kann mit der Methode des metameren Weißpunktes der melanopische Wirkungsfaktor auf einen Wert von $a_{mel,v} = 0,663$ (entspricht einer weißen LED mit 4200 K) verringert werden. Dieser Wert ist größer als der Wert der Methode der Blau-

lichtreduzierung ($a_{mel,v} = 0,515$; entspricht etwa einer weißen LED mit 3600 K). Der kleinere Wert der Methode der Blaulichtreduzierung ist vorteilhafter für die Unterstützung des zirkadianen Systems. Durch eine Verschiebung der blauen Peak-Wellenlänge bei der Methode des metameren Weißpunktes auf 430 nm entspricht $a_{mel,v} = 0,567$ ungefähr dem Wert der Blaulichtreduktion. Blaue Bildinhalte werden jedoch subjektiv violett wahrgenommen.

Die Ergebnisse der Probandenstudien zeigen eine Präferenz der Methode des metameren Weißpunktes. Bei der subjektiven Bewertung der Bildqualität mit den Bewertungskriterien Qualität, Farbsättigung und Natürlichkeit wird kein signifikanter Unterschied zwischen dem Tag- und Nachtmodus wahrgenommen. Bei der Methode der Blaulichtreduzierung sind allen drei Bewertungskriterien signifikant geringer als bei dem nächtlichen Modus mit der Software f.lux in Einstellung 3400 K . Geringere Werte der Bewertungskriterien bedeuten, dass bei der Methode der Blaulichtreduzierung ein Unterschied deutlich wahrnehmbar ist.

6.2 Grenzen der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit sind Vereinfachungen zur praktischen Umsetzung und Realisierbarkeit der entwickelten Methode getroffen worden. Der Übergang zwischen Tag- und Nachtmodus wurde nicht betrachtet. Zur Durchführung der Probandenstudie der wahrgenommenen Bildqualität wurde die Annahme getroffen, dass zwischen dem Tag- und Nachtmodus eine zeitliche Differenz ist. Dies soll die reale Bedingung darstellen, dass die beiden Modi sowohl bei der Methode des metameren Weißpunktes als auch bei der Methode der Blaulichtreduzierung nicht miteinander verglichen werden können. Die durchgeführte Untersuchung nutzt den Effekt der Farberinnerung, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben (Witzel und Gegenfurtner 2014; Witzel und Hansen 2015). Da die nicht-visuelle Lichtwirkung von der Beleuchtungsstärke und der spektralen Zusammensetzung des Lichts abhängt (Kapitel 5.3), wirkt sich diese Vereinfachung nicht auf das Ergebnis aus.

Die Wahrnehmbarkeit des Wechsels zwischen Tag- und Nachtmodus ist abhängig von der Geschwindigkeit. K. Bieske zeigt in ihrer Arbeit, dass ein Wechsel der Lichtfarbe der Raumbelichtung von 12 K/s von den Probanden akzeptiert wird. Des Weiteren wird die Akzeptanz erhöht, wenn alle 1000 K eine Pause von einer Minute integriert ist (Bieske 2010). Der Wechsel zwischen dem Tag- und Nachtmodus hat nur eine geringe Veränderung der Farbtemperatur zur Folge. Im direkten Vergleich zweier Bildinhalte ist jedoch die spektrale Veränderung wahrnehmbar (Kapitel 5.1). Den Zeitumfang, in dem der Wechsel zwischen dem Tag- und Nachtmodus durchgeführt werden soll, gilt es in zukünftigen Forschungsprojekten zu untersuchen.

6.3 Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Eine spektrale Verschiebung der blauen Peak-Wellenlänge der Displaybeleuchtung hin zu kleineren Wellenlängen (430 nm) reduziert den nächtlichen Einfluss auf das zirkadiane System.
- Eine spektrale Veränderung der Displaybeleuchtung ist bei direktem Vergleich zweier Bildinhalte wahrnehmbar, auch wenn der Farbabstand $\Delta E_{00} < 1$ ist.
- Mit der Methode des metameren Weißpunktes kann das zirkadiane System des Menschen unterstützt werden. Bei identischer Leuchtdichte und identischem Farbort des Weißpunktes eines Displays kann jedoch die nicht-visuelle Lichtwirkung nicht so weit reduziert werden wie bei der Methode der Blaulichtreduzierung. Ein physiologisch messbarer Einfluss auf die Melatoninsuppression ist bei dieser Methode in der Nacht zu erwarten (vgl. Kapitel 6.4).
- Bei der Methode des metameren Weißpunktes wird der Unterschied zwischen dem Tag- und Nachtmodus geringer wahrgenommen als bei der Methode der Blaulichtreduzierung.
- Zur Unterstützung des zirkadianen Systems ist bei der Methode des metameren Weißpunktes eine gleichzeitige Verringerung der Gesamthelligkeit des Displays in der Nacht zu empfehlen. Dadurch wird die melanopische Beleuchtungsstärke am Auge reduziert.

Um das zirkadiane System des Menschen zu unterstützen, ist es notwendig, alle Lichtquellen in einem Raum zu berücksichtigen. Um eine Störung des Tag-Nacht-Rhythmus auf Dauer zu vermeiden, sollten alle Lichtquellen denen der Mensch ausgesetzt ist, blaues Licht am Abend und in der Nacht reduzieren. Zur Verbesserung der Beleuchtung am Arbeitsplatz ist es daher sinnvoll, nicht-visuelle Lichtwirkungen der Allgemeinbeleuchtung und von Displays in die Normen wie die DIN EN 12464-1 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2011-08-01) und in Arbeitsstättenrichtlinien wie die ASR A3.4 (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2014) zu integrieren.

Zur Unterstützung des zirkadianen Systems durch Displays ist eine spektrale Veränderung des Lichtspektrums zwischen dem Tag und der Nacht zu empfehlen. Für die Gestaltung und Auslegung von Anzeigegeräten ist eine Kombination aus der entwickelten Methode des metameren Weißpunktes und der Methode der Blaulichtreduzierung sinnvoll. Dies bedeutet, zwischen dem Tag- und Nachtmodus werden die Peak-Wellenlängen verschoben und gleichzeitig wird die Gesamthelligkeit sowie die Anteile des blauen Lichts reduziert.

Studie	IAO-UPK 2009		CwD Studie	
	LP2480zx	LP2475w	CwD	CwD
Display			CwD	CwD
Backlight / Modus	LED	CCFL	Tagmodus	Nachtmodus
Beleuchtungsstärke [lx]	100	100	100	100
Leuchtdichte [cd/m^2]	250	250	250	250
Farbtemperatur [K]	6 653	4 775	6 212	6 121
$a_{mel,v}$	0,898	0,761	1,150	0,663
$E_{V,mel,D65}$ (MDEI) [lx]	99,17	84,01	126,9	73,13
$E_{e,z}$ (Melan.) [$\mu W/cm^2$]	13,15	11,14	16,83	9,7
$E_{e,lc}$ (Erythr.) [$\mu W/cm^2$]	16,73	16,67	17,83	16,29
$E_{e,mc}$ (Chlor.) [$\mu W/cm^2$]	15,98	15,48	17,21	14,86
$E_{e,sc}$ (Cyan.) [$\mu W/cm^2$]	8,39	3,39	5,89	7,16
$E_{e,r}$ (Rhod.) [$\mu W/cm^2$]	16,06	14,51	18,60	12,96

Tabelle 6.1: Vergleich der nicht-visuellen Bewertung der IAO-UPK-Studie von 2009 (Cajochen et al. 2011) mit dem CwD-Prototyp im Tag- und Nachtmodus

6.4 Ausblick

Die physiologische Wirkung des Tagmodus und des Nachtmodus des CwD-Prototyps werden in einer weiterführenden Studie im Chronobiologie Labor der Universitären Psychiatrischen Kliniken in Basel untersucht. Ziel ist, die vorhergesagte nicht-visuelle Lichtwirkung des Tag- und Nachtmodus auf die Melatoninsuppression und Schlafqualität mithilfe physiologischer Messungen zu überprüfen.

Werden die Ergebnisse der nicht-visuellen Lichtwirkung des CwD-Prototyps mit der 2009 durchgeführten IAO-UPK-Studie verglichen (Tabelle 6.1), kann folgende Erwartung an das Ergebnis des Experiments gestellt werden:

Die Beleuchtungsstärke am Auge wird für das Experiment auf 100 lx bei einer Leuchtdichte der Displays von 250 cd/m^2 angenommen. Die Ergebnisse dürften einen größeren melanopischen Wirkungsfaktor des CwD-Tagmodus ($a_{mel,v} = 1,150$) im Vergleich zum LED-Display HP LP2480zx ($a_{mel,v} = 0,898$) zeigen. Der melanopische Wirkungsfaktor des CwD-Nachtmodus ($a_{mel,v} = 0,663$) wird vermutlich kleiner als der des CCFL-Displays HP LP2475w ($a_{mel,v} = 0,761$) sein. Folglich ist der Unterschied der nicht-visuellen Lichtwirkung zwischen dem Tag- und Nachtmodus des CwD-Prototyps vermutlich größer als der Unterschied der beiden Displays in der IAO-UPK-Studie. Ein signifikanter Unterschied in der Melatoninsuppression ist zu erwarten.

6.4.1 Umsetzung in die Praxis

Der Markt für PC-Monitore ist sehr preissensibel. Der Gesamtumsatz von Monitoren in Deutschland fiel zwischen den Jahren 2005 von etwa 880 Mio. Euro auf etwa 370 Mio. Euro im Jahr 2013. Seit 2014 steigt dieser wieder leicht an und lag im Jahr 2016 bei 468 Mio. Euro (Consumer und Home Electronics 2017). Der weltweite Absatz von PC-Monitoren fällt. Waren es 2012 pro Quartal etwa 35 Mio. verkaufte Stück, sind es 2017 noch etwa 30 Mio. Stück (IDC Research 2018). Die Durchschnittspreise für PC-Monitore variieren. Im Jahr 2005 waren es 297 Euro. Vier Jahre später, 2009 war der Tiefstand mit 168 Euro erreicht. Im Jahr 2017 lag der Durchschnittspreis eines PC-Monitors bei 220 Euro (Consumer und Home Electronics 2018).

Da der CwD-Prototyp mehr als drei Primärfarben zur Hinterleuchtung benötigt, ist durch die größere Anzahl an LEDs und der aufwendigeren Ansteuerung der LEDs ein höherer Preis zu erwarten. Um zu einem marktfähigen Produkt zu gelangen sind weitere Forschungen und Entwicklungen nötig.

6.4.2 Zukünftige Forschungsthemen

Weitere Forschung ist nötig, um den gemeinsamen Farbraum zwischen dem Tag- und Nachtmodus zu vergrößern. Beispielsweise kann durch neue Halbleitermaterialien, basierend auf Quantenpunkten, der Farbraum von Displays durch Verringerung der LED-Halbwertsbreite vergrößert werden (Coe-Sullivan 2016; Zhang et al. 2015). Mit diesen Quantenmaterialien ist es möglich, die Peak-Wellenlängen der Displayhintergrund LEDs auf das menschliche zirkadiane System anzupassen (Erdem und Demir 2018).

Ist der gemeinsame Farbraum des Tag- und Nachtmodus ausreichend groß, ist eine metamere Farbanpassung aller Farben des gemeinsamen Farbraumes realisierbar. Ein möglicher Ansatz ist die Anwendung der ICC-Profilierung auf die Methode des metameren Weißpunktes. ICC-Profilierung ist ein standardisiertes Verfahren zur Farbanpassung unterschiedlicher Geräte mit unterschiedlichem Farbraum (ISO 2010-12-01). Beispielsweise werden Drucker, Monitore und Scanner aufeinander kalibriert, damit alle Geräte eine möglichst identische Farbdarstellung aufweisen. Bei der ICC-Farbproduktion wird ein definierter RGB-Wert an alle Geräte gesendet. Das ICC-Profil wandelt diesen Wert in den Gerätefarbraum um und zeigt eine entsprechende Farbe, die denselben Farbreiz bzw. Farbstimulus erzeugen soll. In Abbildung 6.1 ist ein möglicher Ansatz dieser Profilierung auf Basis von J. Schanda zu sehen (Schanda 2007). Die gewählten Primärfarben des Displays definieren den Gerätefarbraum. Die Displaymodis werden durch optische Vermessung mit Farbmustern nach dem numerischen Modell charakterisiert (Anhang B.1.1). Das Farberscheinungsmodell ist die farbmtrische Beschreibung des Ausgangs-

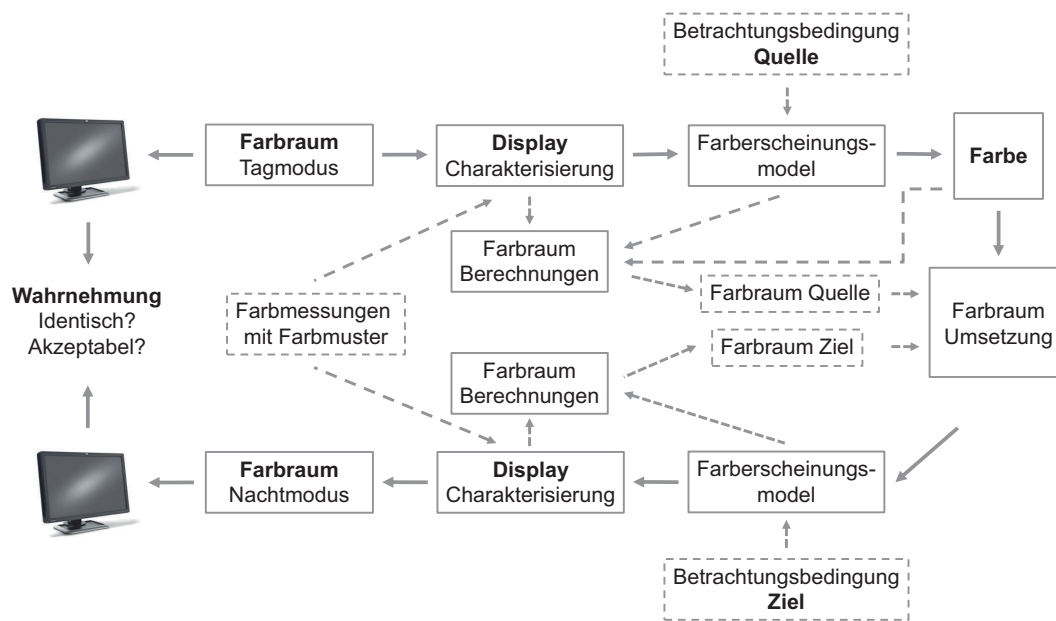


Abbildung 6.1: Funktionsweise einer möglichen Farbanpassung angelehnt an die ICC-Profilierung nach J. Schanda (Schanda 2007)

und Zielfarbraumes. Dies entspricht einer Abstraktionsebene zwischen dem Gerätefarbraum und dem RGB-Farbraum. Die Farbumsetzung ist die Umrechnung einer Farbe von einem in den anderen Betriebsmodus. Die Umrechnung basiert auf der Metameriebedingung nach Formel 2.8. In einer Matrixnotation werden die charakterisierten Displaymodi mit den RGB-Werten als Tristimulus gleichgesetzt. Der resultierende Gamut nach der Umrechnung entspricht dann der Schnittmenge der beiden RGB-Kombinationen. Die Verwendung der ICC-Methode bildet die beiden Farbräume der jeweiligen RGB-Kombinationen auf die gemeinsame Fläche ab.

Ein weiteres Forschungsthema ergibt sich aus dem Übergang zwischen dem Tag- und Nachtmodus. Die Fragestellung lautet: Wie ist die technische Umsetzung und Farbberechnung bei dem Wechsel zwischen zwei RGB-Kombinationen. Ein möglicher Ansatz hierzu ist die Farbberechnung in „Multi-Primary Displays“ (MPD), wie in Kapitel 2.4.5 beschrieben.

A Anhang: Grundlagen

Dieses Kapitel im Anhang dient der Ergänzung von Grundlagen zur Farbwahrnehmung, Farbräumen und nicht-visueller Lichtwirkungen, auf die in dieser Arbeit referenziert wird.

A.1 Wahrnehmung und Farben

A.1.1 Graßmannsche Gesetze der Farbenlehre

1853 beschreibt Graßmann (Graßmann 1853; Schanda 2007) erstmals die empirischen Gesetze zur Farbmischung. Diese Gesetze beschreiben die menschliche Wahrnehmung und sind nicht direkt auf andere Lebewesen übertragbar.

1. Jeder Farbeindruck kann durch drei mathematisch bestimmbare Grundgrößen beschrieben werden: Grundfarben (Farbton), Farbintensität (Helligkeit der Farbe) und die Weißintensität (Helligkeit des gemischten Weißes).
2. Verändert man einen Farbton stetig und vermischt diesen mit einer zweiten Farbe, die aber unverändert bleibt, so ändert sich auch der Farbton stetig, der daraus durch additive Farbmischung entsteht.
3. Der Farbton einer durch additive Farbmischung entstandenen Farbe hängt nur vom Farbeindruck der Ausgangsfarben ab, nicht jedoch von deren physikalischen (spektralen) Zusammensetzungen.
4. Die Totalintensität (Farbintensität) einer additiven Farbmischung ist die Summe der Totalintensitäten der an ihr beteiligten Farben (Ausgangsfarben).

A.1.2 Wahrnehmbarer Farbunterschied

Ergänzungen zur Farbabstandsformel CIEDE2000 (ΔE_{00})

Die in Formel 2.15 verwendeten Faktoren sind folgende:

$$\begin{aligned}
 L' &= L^* \\
 a' &= a^*(1 + G) \\
 b' &= b^* \\
 G &= 0,5 \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}_{ab}^{*7}}{\bar{C}_{ab}^{*7} + 25^7}} \right)
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

Die Gewichtungsfunktionen S_L , S_C und S_H passen den Farbabstand an die Position der zu untersuchenden Farbpaare in L' , a' und b' an nach:

$$\begin{aligned}
 S_L &= 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}} \\
 S_C &= 1 + 0,045\bar{C}' \\
 S_H &= 1 + 0,015\bar{C}'T \\
 T &= 1 - 0,17\cos(\bar{h}' - 30) + 0,24\cos(2\bar{h}') \\
 &\quad + 0,32\cos(3\bar{h}' + 6) - \cos(4\bar{h}' - 63)
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

$$\begin{aligned}
 R_T &= -\sin(2\Delta\Theta)R_C \\
 \Delta\Theta &= 30\exp\left\{-\left[\frac{\bar{h}' - 275}{25}\right]^2\right\} \\
 R_C &= 2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}
 \end{aligned} \tag{A.3}$$

A.1.3 Farbwiedergabe

In Tabelle A.1 sind die 14 Testfarben nach Norm DIN 6169 und CIE 13.3 beschrieben im Munsell-Farbsystem zu sehen (Deutsches Institut für Normung e.V. 1976-01-01).

R_i	Munsell Notation	Farbnotation nach DIN
R1	7,5 R 6/4	Altrosa
R2	5 Y 6/4	Senfgelb
R3	5 GY 6/8	Gelbgrün
R4	2,5 G 6/6	Hellgrün
R5	10 BG 6/4	Türkisblau
R6	5 PB 6/8	Himmelblau
R7	2,5,P 6/8	Asterviolett
R8	10 P 6/8	Fliederviolett
R9	4,5 R 4/13	Rot gesättigt
R10	5 Y 8/10	Gelb gesättigt
R11	4,5 G 5/8	Grün gesättigt
R12	3 PB 3/11	Blau gesättigt
R13	5 YR 8/4	Rosa(Hautfarbe)
R14	5 GY 4/4	Blattgrün

Tabelle A.1: 14 Testfarben nach DIN 6169

A.2 Nicht-visuelle Bewertungsmethoden

A.2.1 Beispiel spektraler Beleuchtungsmessung

Anhand des folgenden Beispiels wird die Problematik der Messung der Beleuchtungsstärke blauer Lichtquellen und die Angabe des Messwertes in lx verdeutlicht:

In der Arbeit von Wood et al. werden blaue LEDs (470 nm) mit einer Beleuchtungsstärke von 40 lx und einer Bestrahlungsstärke von $40\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$ angegeben (Wood et al. 2013). In Abbildung 2.3(b) ist die $V(\lambda)$ -Kurve zu sehen. Photopische Einheiten wie die Beleuchtungsstärke werden mit der $V(\lambda)$ -Kurve gewichtet. Bei 470 nm ist die relative Empfindlichkeit der $V(\lambda)$ -Kurve etwa 0,13. Energetisch betrachtet, ausgehend von der Bestrahlungsstärke, wird das blaue Licht mit 13% bewertet. Die Angabe der Messergebnisse in Beleuchtungsstärke blauer Lichtquellen hat demzufolge eine vielfach größere Energie der blauen Strahlung zur Folge und kann nicht mit weißen Lichtquellen der selben Beleuchtungsstärke verglichen werden.

Wird für ein typisches LED-Spektrum einer blauen LED mit 470 nm Peak-Wellenlänge der melanopische Wirkungsfaktor berechnet, ergibt sich ein Wert von $a_{mel,v} = 9,4$ und ein MDEI von etwa 250 lx . Somit hat eine 470 nm blaue LED mit 40 lx am Auge dieselbe nicht-visuelle Lichtwirkung wie Tageslicht mit 250 lx am Auge oder eine kaltweiße LED ($6\,500\text{ K}$; $a_{mel,v} = 0,725$) mit 320 lx .

A.2.2 Ergänzungen zu Circadian Light und Circadian Stimulus

Die Einheiten der Gleichung 2.31 sind wie folgt definiert (Rea und Figueiro 2018): CL_A ist die Einheit des „Circadian Light“. Die Konstante 1548 dient der Normalisierung von CL_A , so dass bei einem schwarzen Körper mit $2\,856\text{ K}$ und $1\,000\text{ lx}$ der Wert $CL_A = 1\,000$ entsteht. E_λ ist die spektrale Bestrahlungsverteilung der Lichtquelle. Mc_λ ist der korrigierte Wert des Melanopsins für die Transmission der Augenlinse. S_λ ist die spektrale Empfindlichkeit der S-Zapfen; mp_λ die Transmission des Makula-Pigments. $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ beschreiben die photopische und skotopische Empfindlichkeitsfunktion, $RodSat$ die Halbsättigungskonstante der Stäbchen $= 6,4\text{ W/m}^2$, $k = 0,2616$, $a_{b-y} = 0,7$ und $a_{rod} = 3,3$.

Abbildung A.1 zeigt die Problematik der entstehenden Sprungfunktion, wenn die Farbtemperatur eines schwarzen Körpers mit der Formel 2.31 berechnet wird. Bei $3\,500\text{ K}$ entsteht ein Sprung. Dies hat zur Folge, dass im Bereich zwischen $2\,000\text{ K}$ und $3\,500\text{ K}$ sowie zwischen $3\,500\text{ K}$ und $5\,500\text{ K}$ ein identischer Wert für CL_A entstehen kann.

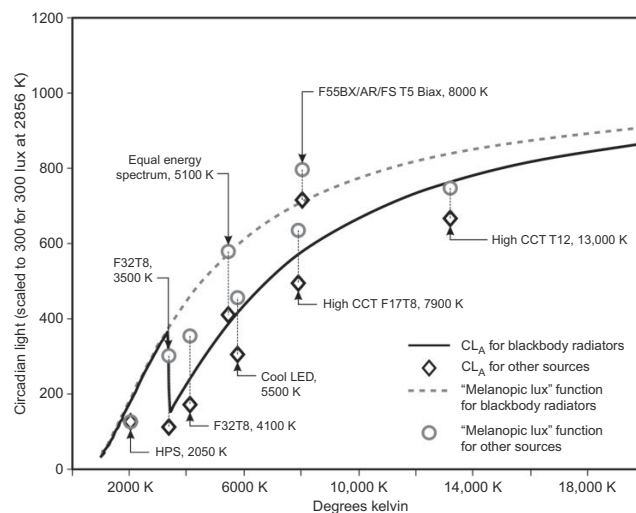


Abbildung A.1: „Circadian Light“, aufgetragen über die Farbtemperatur eines schwarzen Körpers aus Rea et al. (Rea und Figueiro 2018)

A.3 Schädigung durch blaues Licht

Tabelle A.2 listet die Risikogruppen und Tabelle A.3 die Emissionsgrenzwerte der Risikogruppen nach DIN EN 62471:2009-03 auf (Deutsches Institut für Normung e.V. 2009-03-01).

Lampengruppe	Beschreibung	Max. Expositionszeit
Freie Gruppe Risikogruppe 0	Keine photobiologische Gefahr. Kontinuierliche Exposition möglich.	$t \geq 10\,000\text{ s}$
Risikogruppe 1 (geringes Risiko)	Keine Gefährdung unter Berücksichtigung normalen menschlichen Verhaltens. Kontinuierliche Exposition ist ausgenommen.	$100\text{ s} < t < 10\,000\text{ s}$
Risikogruppe 2 (mittleres Risiko)	Aufgrund von Abwendereaktionen heller Lichtquellen keine Gefahr ausgehend. Risikogruppe für Lampen, die Grenzwerte der Gruppe 1 überschreiten.	$0,25\text{ s} < t < 100\text{ s}$
Risikogruppe 3 (hohes Risiko)	Kurzzeitige Exposition führt zu Schädigungen.	$t < 0,25\text{ s}$

Tabelle A.2: Klassifizierung von Lampen in Risikogruppen nach DIN EN 62471

Risiko	Bewertungs- funktion	Emissionsgrenzwerte			Einheiten
		Gruppe 0	Gruppe 1	Gruppe 2	
Blaulicht	$B(\lambda)$	100	10 000	4 000 000	$W/(m^2 sr)$
Blaulicht, kleine Quellen*	$B(\lambda)$	1,0	1,0	400	W/m^2

* Kleine Quellen sind definiert mit einer Winkelausdehnung von $\alpha < 0,011$ Radiant

Tabelle A.3: Emissionsgrenzwerte der Risikogruppen nach DIN EN 62471

A.4 „Silent Substitution“ Methode

Estévez (Estévez und Spekreijse 1982) beschreiben die **Silent Substitution** Methode (stille Substitution) als eine spektrale Kompensation, die von Mitchell und Rushtons „Prinzip der Univarianz“ abgeleitet wird. Deren Prinzip sagt aus, dass das Ergebnis des Lichts, das von jeder Klasse von Photorezeptoren detektiert wird, von dem effektiven Quanteneinfall abhängt; nicht jedoch von der Art der Quanten (Mitchell und Rushton 1971a,b; Rushton et al. 1973a,b,c). Das bedeutet, dass die Antwort eines Photorezeptors eine eindimensionale Variable $r(\lambda, I)$ der Wellenlänge λ und des Photonenflusses I des Stimulus-Lichts ist (Estévez und Spekreijse 1982). Aus der Univarianz folgt, dass durch die Stimuli zweier verschiedener Lichtspektren derselbe Reiz des Photorezeptors ausgelöst wird.

Silent Substitution, auch als „Austausch-Stimulation“ bezeichnet, ist eine Methode, um das Eingangssignal der Zapfen zu untersuchen. Es wird dabei die visuelle Farbtüchtigkeit gemessen. Mit einem Elektretinogramm¹ (ERG) werden die spektrale Strahldichte eines Stimulus als Funktion der Zeit verändert, während andere Eigenschaften wie Größe, Position und Textur konstant gehalten werden. Eine passend gewählte Strahldichte erzeugt differenzielle Photoneinschlüsse in einem einzelnen Zapfentyp, während die anderen Zapfen nicht beeinträchtigt werden. Durch weitere Linearkombinationen von Stimulationen kann jeder Rezeptortyp einzeln angesprochen werden (Widdel und Post 1992).

Estévez beschreibt die metamere Farbwahrnehmung anhand der stillen Substitution folgendermaßen (Estévez und Spekreijse 1982): Die Bedingung für metamere Farbwahrnehmung leitet sich aus Formel 2.8 ab. Zwei physikalisch unterschiedliche Lichtspektren $P(\lambda)$ und $Q(\lambda)$ sind metamer, wenn sie denselben Tristimulus-Reiz hervorrufen. Es gilt:

$$\begin{aligned} X &= \int P(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda = \int Q(\lambda)\bar{r}(\lambda)d\lambda \\ Y &= \int P(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda = \int Q(\lambda)\bar{g}(\lambda)d\lambda \\ Z &= \int P(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda = \int Q(\lambda)\bar{b}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \tag{A.4}$$

Auf Basis von A.4 wird erreicht, dass bei gleichwertigem Quanteneinfall der drei Farbwahrnehmungsmechanismen (beschrieben in Kapitel 2.2.2) der physiologische Tristimulus für zwei Spektren gleich ist. Es gilt:

¹Elektretinogramm ist ein diagnostisches Messgerät zur Erfassung der elektrischen Potenziale in der Netzhaut. Mittels mehrerer Elektroden werden die elektrischen Aktivitäten der Zapfen und Stäbchen aufgezeichnet.

$$\begin{aligned}
 \int P(\lambda)S_1(\lambda)d\lambda &= \int Q(\lambda)S_1(\lambda)d\lambda \\
 \int P(\lambda)S_2(\lambda)d\lambda &= \int Q(\lambda)S_2(\lambda)d\lambda \\
 \int P(\lambda)S_3(\lambda)d\lambda &= \int Q(\lambda)S_3(\lambda)d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{A.5}$$

wobei $S_1(\lambda)$, $S_2(\lambda)$ und $S_3(\lambda)$ die spektrale Quantenempfindlichkeit der Photopigmente darstellt.

Daraus ableitend kann gezeigt werden, dass wenn zwei Lichtquellen eine unterschiedliche physikalische Lichtspektrumsverteilung besitzen, diese visuell übereinstimmen und somit metamer sind. Wenn eine der beiden Lichtquellen durch die andere ausgetauscht wird, kann das menschliche visuelle System dies nicht unterscheiden. Für die stille Substitution nach Estévez ist dies auch gültig, wenn nur zwei der drei Farbmechanismen identisch sind. Dies bedeutet, dass zwei Lichtspektren $M(\lambda)$ und $N(\lambda)$ folgende Eigenschaften besitzen:

$$\begin{aligned}
 \int M(\lambda)S_1(\lambda)d\lambda &= \int N(\lambda)S_1(\lambda)d\lambda \\
 \int M(\lambda)S_2(\lambda)d\lambda &= \int N(\lambda)S_2(\lambda)d\lambda \\
 \int M(\lambda)S_3(\lambda)d\lambda &\neq \int N(\lambda)S_3(\lambda)d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{A.6}$$

Die beiden Spektren $M(\lambda)$ und $N(\lambda)$ werden in diesem Fall als dichromatisch oder partiell metamer bezeichnet. Wird nun eines der beiden Spektren durch das andere ersetzt, bleibt die Veränderung für zwei der drei Farbrezeptoren unbemerkt. Der dritte Farbrezeptor wird dies erkennen, nach der Theorie von Estévez wird dieser aber „schweigen“ (Estévez und Spekreijse 1982).

B Anhang: Charakterisierung von Displaysystemen

B.1 Beziehung der Farbkoordinaten und der CIE-Farbmetrik

Auf den folgenden Seiten werden die Details der Farbcharakterisierung von Displays dargestellt.

B.1.1 Numerisches Modell

Zur Erzeugung eines numerischen Modells muss das entsprechende Gerät zuerst farbmetrisch erfasst werden. Durch die Darstellung bekannter Proben auf dem Displaysystem und deren optischer Vermessung, lässt sich die Beziehung zwischen dem Tristimulus-Wert und dem Gerätefarbraum bestimmen. Diese Beziehung kann als Matrixmultiplikation nach B.1 definiert werden:

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \quad (\text{B.1})$$

Wobei \mathbf{C} der Vektor des CIE-Farbraumes, \mathbf{A} eine 3x3 Matrix der Koeffizienten und \mathbf{D} der Vektor mit den RGB-Werten des Displaysystems ist. Eingesetzt in B.1 ergibt sich die Darstellung nach B.2:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Ist die Beziehung der Farbkoordinaten und des CIE-Farbsystems konstant, sind alle Koeffizienten der Matrix \mathbf{A} konstant für alle Kombinationen der Gerätekoordinaten (Green und MacDonald 2002).

Die Bestimmung der Koeffizienten der Matrix \mathbf{A} funktioniert folgendermaßen: Auf dem Displaysystem wird Rot mit dem normalisierten RGB-Wert (1, 0, 0), Grün mit (0, 1, 0) und Blau mit (0, 0, 1) dargestellt. Die Messung des dazugehörigen Tristimulus-Wertes ergibt die Koeffizienten der 3x3 Matrix nach B.3.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} a_{1,1} \\ a_{2,1} \\ a_{3,1} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} a_{1,2} \\ a_{2,2} \\ a_{3,2} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} a_{1,3} \\ a_{2,3} \\ a_{3,3} \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Ist anstelle der RGB-Werte aber der Tristimulus-Wert XYZ bekannt, kann der RGB-Vektor durch Multiplikation mit der invertierten Farbmatrix von \mathbf{A} , \mathbf{A}^{-1} mit \mathbf{C} berechnet werden nach B.4

$$\mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{C} \quad (\text{B.4})$$

Die Inverse einer Matrix kann mit dem Gauß-Jordan-Algorithmus bestimmt werden (Bronstein et al. 2001; Merziger und Wirth 2006). Eingesetzt in B.4 ergibt sich für den RGB-Wert die Formel B.5:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{\det \mathbf{A}} \begin{bmatrix} a_{2,2}a_{3,3} - a_{2,3}a_{3,2} & a_{1,3}a_{3,2} - a_{1,2}a_{3,3} & a_{1,2}a_{2,3} - a_{1,3}a_{2,2} \\ a_{2,3}a_{3,1} - a_{2,1}a_{3,3} & a_{1,1}a_{3,3} - a_{1,3}a_{3,1} & a_{1,3}a_{2,1} - a_{1,1}a_{2,3} \\ a_{2,1}a_{3,2} - a_{2,2}a_{3,1} & a_{1,2}a_{3,1} - a_{1,1}a_{3,2} & a_{1,1}a_{2,2} - a_{1,2}a_{2,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Wobei $\det \mathbf{A}$ nach der Regel von Sarrus (Merziger und Wirth 2006) bestimmt wird:

$$\det \mathbf{A} = a_{1,1}a_{2,2}a_{3,3} + a_{1,2}a_{2,3}a_{3,1} + a_{1,3}a_{2,1}a_{3,2} - a_{1,2}a_{2,1}a_{3,3} - a_{1,3}a_{2,2}a_{3,1} - a_{1,1}a_{2,3}a_{3,2} \quad (\text{B.6})$$

Wird bei der Modellierung nach B.2 keine hinreichend genaue Transformation erreicht, wird ein Polynom höherer Ordnung benötigt (Green und MacDonald 2002). Ein Modell zweiter Ordnung nach Gleichung B.2 ist:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} & a_{1,5} & a_{1,6} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} & a_{2,5} & a_{2,6} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} & a_{3,5} & a_{3,6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ R^2 \\ G^2 \\ B^2 \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

Die Bestimmung der Koeffizienten der 3x6 Matrix werden identisch wie nach B.3 bestimmt, jedoch mit einer höheren Anzahl von Farbmustern. Diese Art der Bestimmung der Koeffizienten kann bis zu einem Polynomgrad von $n - 1$, wobei n die Anzahl der Farbmuster ist, berechnet werden (Green und MacDonald 2002).

B.2 Charakterisierung des Displayprototyps zur Farbwahrnehmungsuntersuchung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Displaycharakterisierung des CwD-Prototyps aus der Evaluierung (Kapitel 5) dargestellt.

B.2.1 Charakterisierung des Tagmodus

Messwerte zur Charakterisierung der oberen Displayhälfte (Tagmodus) nach DIN EN 61966-4:

Farben	Farbwerte (%)			Farbwertanteile			
	X'	Y'	Z'	x	y	u'	v'
Spitzenrot	65,21	28,20	1,14	0,6896	0,2983	0,5305	0,5162
Spitzengrün	17,34	62,57	17,52	0,178	0,6422	0,0688	0,5584
Spitzenblau	16,90	10,20	104,36	0,1286	0,0776	0,1400	0,1900
Spitzenweiß	98,22	100,00	122,13	0,3066	0,3122	0,2000	0,4581

Tabelle B.1: Farbwerte der charakterisierten oberen Displayhälfte nach DIN EN 61966-4

B.2.2 Charakterisierung des Nachtmodus

Messwerte der unteren Displayhälfte (Nachtmodus) nach DIN EN 61966-4:

Farben	Farbwerte (%)			Farbwertanteile			
	X'	Y'	Z'	x	y	u'	v'
Spitzenrot	48,25	21,45	1,13	0,6812	0,3028	0,5169	0,5170
Spitzengrün	30,24	74,08	4,85	0,2770	0,6786	0,1046	0,5768
Spitzenblau	22,03	4,97	116,76	0,1532	0,0346	0,1972	0,1001
Spitzenweiß	100,04	100,00	122,22	0,3104	0,3103	0,2035	0,4576

Tabelle B.2: Farbwerte der charakterisierten unteren Displayhälfte nach DIN EN 61966-4

B.2.3 Testfarben der Farbwahrnehmungsuntersuchung

Tabelle B.3 listet die RGB-Werte der erzeugten Testfarben der Farbumrechnung aus Kapitel 4.2 für die Farbwahrnehmungsuntersuchung auf.

Testfarbe	RGB-Wert oben			RGB-Wert unten		
	R	G	B	R	G	B
01	0	255	0	0	255	0
02	255	0	0	255	0	0
03	0	0	255	0	0	255
04	213	48	91	252	51	88
05	212	27	14	255	16	13
06	106	255	25	25	245	83
07	130	255	195	48	255	205
08	140	247	237	64	253	242
09	118	188	248	44	201	249
10	39	54	253	0	136	245
11	106	10	3	128	0	0
12	211	21	6	255	0	0
13	32	62	63	0	64	64
14	129	248	251	0	255	255
15	32	31	32	32	32	32
16	255	249	251	255	255	255
17	215	255	13	220	244	79
18	155	33	255	155	88	243
19	203	0	244	223	75	232
20	128	128	0	138	122	39
21	128	0	128	145	39	122
22	192	0	192	217	58	182
23	64	64	64	63	65	65
24	128	128	128	127	131	130
25	192	192	192	190	196	195

Tabelle B.3: RGB-Werte der Testfarben für die beiden Displayhälften

Abbildung B.1 stellt die gemessenen Testfarben aus Tabelle B.3 auf den beiden Displayhälften der Farbwahrnehmungsuntersuchung im $L^*a^*b^*$ Farbraum da.

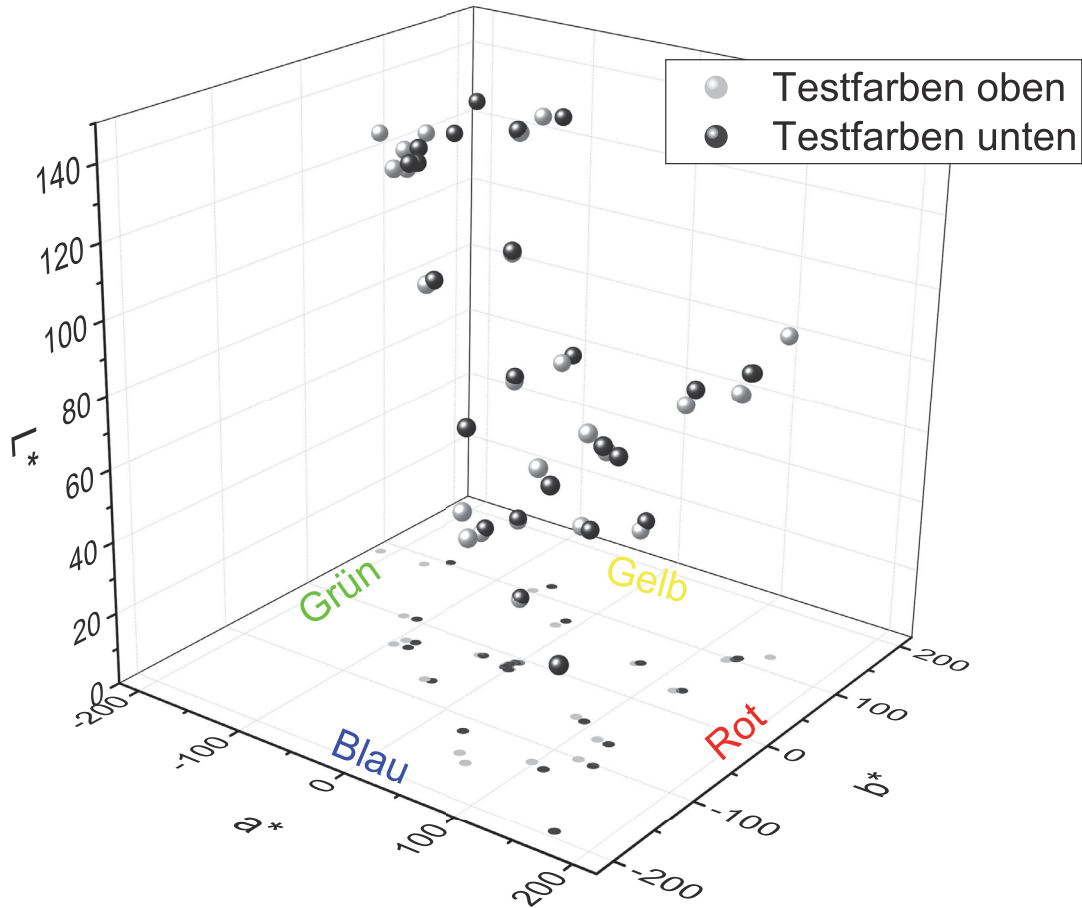


Abbildung B.1: Gemessene Farborte der Testfarben im $L^*a^*b^*$ Farbraum. Die Messwerte werden zusätzlich auf die a^*b^* Farbebene projiziert

B.2.4 Testfarben und Ergebnisse der Retest-Reliabilität

Tabelle B.4 listet die RGB-Werte der Retest-Reliabilität auf. Tabelle B.5 zeigt die Probanden-Ergebnisse der visuellen Analogskala (VAS) der 18 Testfarben.

Retest Testfarbe	RGB-Wert oben			RGB-Wert unten		
	R	G	B	R	G	B
01	0	255	0	0	255	0
02	21	255	7	4	252	17
03	42	255	14	8	251	34
04	63	255	21	12	249	51
05	84	255	24	16	247	68
06	106	255	34	21	245	86
07	0	0	255	0	0	205
08	8	11	255	0	27	253
09	16	22	254	0	54	251
10	24	33	254	0	81	249
11	32	44	253	0	108	247
12	39	54	253	0	136	245
13	255	0	0	255	0	0
14	246	5	3	255	3	3
15	237	10	6	255	6	6
16	228	15	9	255	9	9
17	219	20	12	255	12	12
18	212	27	14	255	16	13

Tabelle B.4: RGB-Werte der Testfarben der beiden Displayhälften für die Retest-Reliabilitätsmessung

	Proband 1			Proband 2		
	Mess. 1	Mess. 2	Mess. 3	Mess. 1	Mess. 2	Mess. 1
Farbe 1	75	96	90	87	46	100
Farbe 2	80	82	86	90	12	100
Farbe 3	83	66	84	93	11	100
Farbe 4	74	56	86	88	73	96
Farbe 5	68	64	77	17	85	88
Farbe 6	65	66	86	71	100	85
Farbe 7	70	75	85	65	5	83
Farbe 8	83	82	97	89	7	82
Farbe 9	87	71	84	17	28	83
Farbe 10	65	74	84	87	28	86
Farbe 11	90	55	84	95	100	91
Farbe 12	90	56	82	80	84	100
Farbe 13	40	25	16	6	18	10
Farbe 14	7	46	16	25	11	10
Farbe 15	28	11	7	1	0	2
Farbe 16	12	41	8	9	5	3
Farbe 17	14	25	14	1	12	2
Farbe 18	4	35	15	22	49	24

Tabelle B.5: Retest-Reliabilität Messdaten (VAS) der beiden Probanden

C Anhang: Messsysteme

In diesem Abschnitt des Anhangs befinden sich die technische Beschreibung der Messgeräte und der Messaufbauten.

C.1 Messgeräte

C.1.1 Gigahertz-Optik BTS256-LED

Das Gigahertz-Optik BTS256-LED ist ein kompaktes Spektralradiometer mit integrierter Ulbricht-Kugel zur Messung von Lichtstrom, Farbe und Farbwiedergabe von Einzel-LEDs. Mit aufgesetzter Kosinus-Streuscheibe können die spektrale Strahlungsleistung, Farbtemperatur, CRI und der Farbort gemessen werden.

Mit dem BTS256-LED-DA Streuscheibenadapter kann das BTS256-LED zur Messung der Beleuchtungsstärke umgerüstet werden. Die auf ± 30 Grad eingeschränkte Spezifikation der Kosinus-Blickfeldfunktion eignet sich zur Messung der am Auge ankommenden Beleuchtungsstärke.

Abbildung C.1 zeigt die winkelabhängige Charakteristik der Kosinus-Streuscheibe BTS256-LED-DA¹. Bis zu einem Winkel von $\pm 30^\circ$ (Transmissionswert = 0,72) ist die Streuscheibe kalibriert. Wird das Messgerät mit der Kosinus-Streuscheibe für einen größeren Betrachtungswinkel verwendet, ergibt sich ein winkelanhängiger Fehler.

¹Die Messung der Charakteristik wurde vom Hersteller Gigahertz-Optik durchgeführt und bereitgestellt.

Hersteller	Gigahertz-Optik GmbH
Modell	BTS256-LED mit Streuscheibenadapter
Kosinus Diffuser	Diffuses Quarzglas mit 20 mm Durchmesser
Korrigierter Messwinkel	$\pm 30^\circ$
Wellenlängenbereich	380 nm – 750 nm
Optische Bandbreite	5 nm
Datenaufösung	1 nm
Messbereich	40 lx bis 400 000 lx (spektral)
Beleuchtungsstärke	0,2 lx bis 250 000 lx (integral)
Messgenauigkeit	$\pm 4\%$
Software	S-BTS256 v1.1.7

Tabelle C.1: Technische Daten des Gigahertz-Optik BTS256-LED

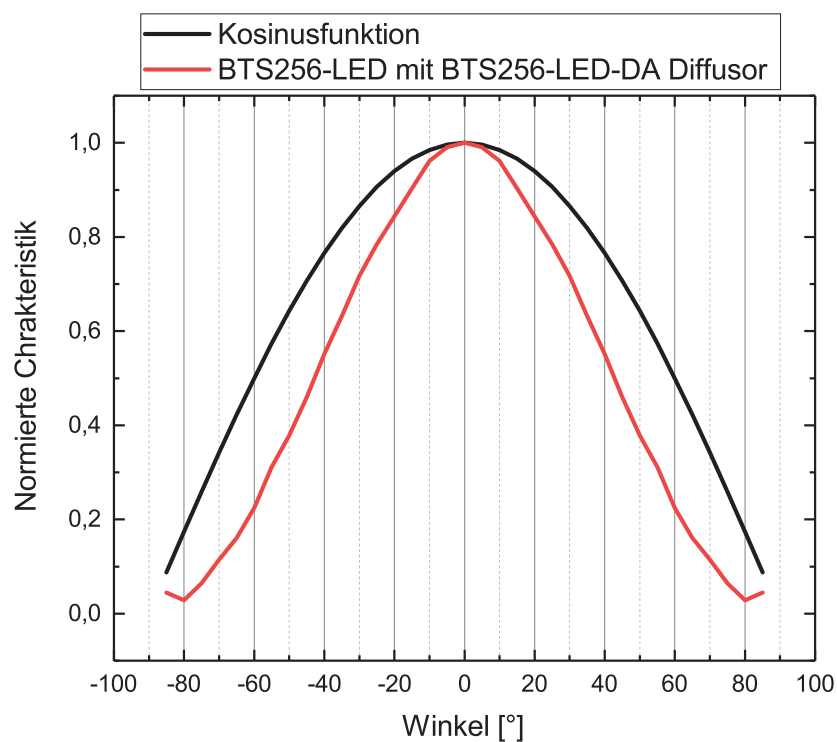


Abbildung C.1: Auf 1 normierte winkelanhängige Charakteristik der Streuscheibe

C.1.2 Gigahertz-Optik X1-3

Das Gigahertz-Optik X1-3 ist ein Handmess-Optometer zur Messung der Gefährdung durch UV und Blaulicht. Das Messgerät wird mit dem XD-45-HB Messkopf und mit einem 200 mm Vorsatz-Tubus verwendet.

Hersteller	Gigahertz-Optik GmbH
Modell	X1-3
Messkopf	XD-45-HB
Wellenlängenbereich	280 nm – 780 nm
Messbereich $B(\lambda)$	0,02 mW/m ² – 100 W/m ²
$B(300 - 380\text{nm})$	2 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ – 100 W/m ²
$B(380 - 600\text{nm})$	20 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ – 1000 W/m ²
$B(600 - 780\text{nm})$	0,05 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ – 2 W/m ²
Vorsatz Tubus	200 mm Vorsatz Tubus
Aperture Tubus	$A = 0,000314\text{ m}^2 / \Omega = 0,00785\text{ sr}$
Software	S-EXM-X1-3 v0.2 (Excel Datei)

Tabelle C.2: Technische Daten des Gigahertz-Optik X1-3

C.1.3 Konica Minolta CS-2000A

Das Konica Minolta CS-2000A ist ein Spektralradiometer zur Messung von Lichtquellen bezüglich der Leuchtdichte, farbmatischer Daten und des Spektrum bis hinab zu 0,005 cd/m².

Hersteller	Konica Minolta, Inc.
Modell	CS-2000A
Wellenlängenbereich	380 nm – 750 nm
Wellenlängenauflösung	0,9 nm/pixel
Optische Bandbreite	1,0 nm
Wellenlängenpräzision	±0,3 nm
Messwinkel	0,1°, 0,2° und 1°
Messbereich	0,0005 cd/m ² (1°) – 500 000 cd/m ² (0,1°)
Messgenauigkeit	±2 %
Software	CS-S10W v1.8

Tabelle C.3: Technische Daten des Konica Minolta CS-2000A

C.1.4 LMK mobile advanced

Die LMK mobile advanced der Technoteam Bildverarbeitung GmbH ist eine kalibrierte Spiegelreflexkamera für die Leuchtdichtefotografie.

Hersteller	Technoteam Bildverarbeitung GmbH
Modell	LMK mobile advanced
Sensor	CMOS Canon APS-C mit 4272(H) x 2848(V)
Blendenstufen	F4 - F11 (kalibriert) in 1/3 Stufen
Brennweite	18 mm: 65°(H) x 45°(V) 50 mm: 28°(H) x 19°(V)
Messbereich	0,36 cd/m ² – 140 kcd/m ²
Messgenauigkeit	$\Delta L = 2,5\%$
Software	LMK LabSoft Standard Color v20170919

Tabelle C.4: Technische Daten des Technoteam LMK mobile advanced

C.2 Messung der Beleuchtungsstärke am Auge

Die Höhe der Messposition ergibt sich aus der anthropometrischen Arbeitsplatzgestaltung. Die Sehachse im Sitzen bei einer entspannten Kopf- und Augenhaltung beträgt etwa 35° bis 40° gegenüber der Waagrechten (Schmauder und Spanner-Ulmer 2014). Die Position der Augen bzw. des Messgerätes wird ableitend daraus auf die Höhe der Oberkante des Displays gewählt. Der Messkopf des Messgerätes ist senkrecht auf die Oberkante des Displays ausgerichtet. Abbildung C.2(a) zeigt den Messaufbau zur Messung der spektralen Beleuchtungsstärke horizontal am Bildschirmarbeitsplatz nach DIN EN 12464-1 (Deutsches Institut für Normung e.V. 2011-08-01). Abbildung C.2(b) zeigt die Messung der spektralen Beleuchtungsstärke vertikal am Auge.

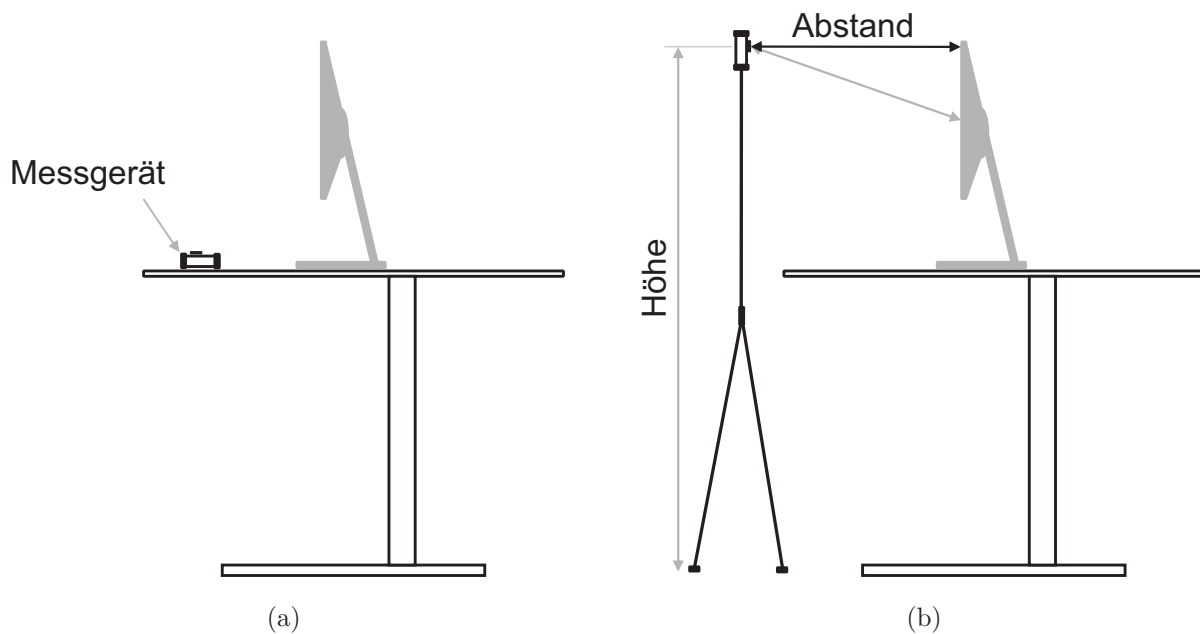


Abbildung C.2: Messaufbau für die Messungen der spektralen Beleuchtungsstärke horizontal am Bildschirmarbeitsplatz (a) nach DIN EN 12464-1 und vertikal am Auge des Nutzers (b) (Pross et al. 2017)

Abbildung C.3 zeigt zwei Messungen der Beleuchtungsstärke am Auge bei Nutzung eines 27“ Displays in Abhängigkeit vom Sehabstand. Dabei wird der Winkel des Messgerätes verändert. Die schwarze Kurve zeigt die Messung senkrecht zur Oberkante des Displays. Die graue Kurve zeigt die Messung jeweils zur Mitte des Displays. Die Abweichung der beiden Messungen bei einem Sehabstand von 1000 mm beträgt ca. $1,5\%$. Dieser Unterschied liegt unterhalb der Toleranz der Kalibrierung des Messgerätes. Die gewählte Messmethode senkrecht zur Oberkante des Displays ist daraus folgend für die Bewertung der am Auge ankommenden Beleuchtungsstärke geeignet.

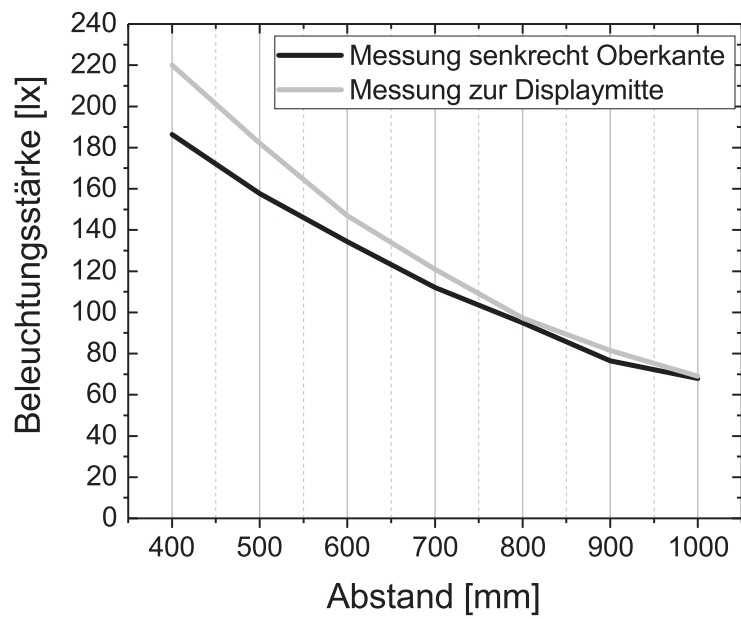


Abbildung C.3: Messung der Beleuchtungsstärke am Auge in Abhängigkeit vom Sehabstand und vom Beobachtungswinkel

D Anhang: Bildnachweise

In diesem Abschnitt des Anhangs werden die Bildnachweise der Evaluierung aufgelistet.

D.1 Testbilder der Evaluierung: Farbwahrnehmung

Testbild	Bildname	Quelle
(a)	Canyon	https://pixabay.com/de/horseshoe-bend-1908283
(b)	Graßhüpfer	https://wallpaperscraft.com/download/flower_grasshopper_chamomile_insect_109533/1920x1080
(c)	See Berge 1	https://www.wallpaperflare.com/time-lapse-photography-of-rock-over-body-of-water-under-white-sky-wallpaper-23034
(d)	Blumenwiese	https://www.pexels.com/photo/landscape-red-field-flowers-80453/
(e)	Stifte	https://www.pexels.com/de/foto/bleistift-farbe-farben-regenbogen-65948/

Tabelle D.1: Bildnachweise der ersten Probandenstudie: Untersuchung der Farbwahrnehmung bei variablem Farbspektrum

D.2 Testbilder der Evaluierung: Bildqualität

Testbild	Bildname	Quelle
(a)	Canyon	https://pixabay.com/de/horseshoe-bend-1908283
(b)	Graßhüpfer	https://wallpaperscraft.com/download/flower_grasshopper_cha momile_insect_109533/1920x1080
(c)	See Berge 1	https://www.wallpaperflare.com/time-lapse-photography-of-rock-over-body-of-water-under-white-sky-wallpaper-23034
(d)	Blumenwiese	https://www.pexels.com/photo/landscape-red-field-flowers-80453/
(e)	Stifte	https://www.pexels.com/de/foto/bleistift-farbe-farben-regenbogen-65948/
(f)	Laubwald	https://pixabay.com/de/herbst-rot-saison-wald-natur-1072821/
(g)	Strand	https://pixabay.com/de/wasser-fussabdruck-sand-strand-3427326/
(h)	Küste	https://pixabay.com/de/das-meer-der-wasserfall-3058780/
(i)	Nebel	https://pixabay.com/de/%C3%BCber-den-wolken-fog-nebel-wolken-2879455/
(j)	Fußball	https://pixabay.com/de/fu%C3%9Fball-wettbewerb-stadion-kugel-3311817/
(k)	Landschaft	https://pixabay.com/de/landschaft-landschaftlich-see-2092403/
(l)	Porträt 1	https://pixabay.com/de/frau-h%C3%BCbsch-jung-haut-niedlich-3134390/
(m)	Porträt 2	https://pixabay.com/de/frau-portr%C3%A4t-mode-sch%C3%B6ne-m%C3%A4dchen-3299379/
(n)	Stadtzentrum	https://pixabay.com/de/bad-d%C3%BCrkheim-pfalz-weinstra%C3%9Fe-3298264/
(o)	Blumenstrauß	https://pixabay.com/de/wiesenblumen-blumenstrau%C3%9F-vertr%C3%A4umt-3422413/
(p)	Häuser Pastel	https://pixabay.com/de/venedig-italien-burano-insel-sch%C3%B6n-2896591/
(q)	Abstrakt	https://pixabay.com/de/abstrakt-quadrate-anordnung-3227574/
(r)	Schwimmen	https://pixabay.com/de/schwimmen-wasser-tauchen-422546/
(s)	See Berge 2	https://pixabay.com/de/bled-slowenien-see-gebirge-berg-1899264/
(t)	Office Excel	-
(u)	Office Powerpoint 1	-
(v)	Office Powerpoint 2	-
(w)	Office Word	-
(x)	Strandkörbe	https://pixabay.com/de/photos/borkum-strand-urlaub-sommer-3417900/

Tabelle D.2: Bildnachweise der zweiten Probandenstudie: Wahrgenommene Bildqualität bei variablem Spektrum

Literaturverzeichnis

- Ajito, T., Obi, T., Yamaguchi, M. und Ohyama, N. (1999). „Multiprimary color display for liquid crystal display projectors using diffraction grating“. In: *Optical Engineering* 38.11, S. 1883.
- (2000). „Expanded color gamut reproduced by six-primary projection display“. In: *Electronic Imaging*. Hrsg. von Ming H. Wu. SPIE Proceedings. SPIE, S. 130–137.
- Ajito, T., Ohsawa, K., Obi, T., Yamaguchi, M. und Ohyma, N. (2001). „Color conversion method for multiprimary display using matrix switching“. In: *Optical Review* 8.3, S. 191–197.
- Aldaba, M. A., Linhares, J. M. M., Pinto, P. D., Nascimento, S. M. C., Amano, K. und Foster, D. H. (2006). „Visual sensitivity to color errors in images of natural scenes“. In: *Visual neuroscience* 23.3-4, S. 555–559.
- Alfvin, R. L. und Fairchild, M. D. (1997). „Observer variability in metameric color matches using color reproduction media“. In: *Color Research & Application* 22.3, S. 174–188.
- Allebrandt, K. V., Teder-Laving, M., Kantermann, T., Peters, A., Campbell, H., Rudan, I., Wilson, J. F., Metspalu, A. und Roenneberg, T. (2014). „Chronotype and sleep duration: The influence of season of assessment“. In: *Chronobiology International* 31.5, S. 731–740.
- Allen, A. E., Hazelhoff, E. M., Martial, F. P., Cajochen, C. und Lucas, R. J. (2018). „Exploiting metamerism to regulate the impact of a visual display on alertness and melatonin suppression Independent of Visual Appearance“. In: *Sleep* 41.8, zsy100.
- Allen, A. E., Storchi, R., Martial, F. P., Bedford, R. A. und Lucas, R. J. (2017). „Melanopsin contributions to the representation of images in the early visual system“. In: *Current biology: CB* 27.11, 1623–1632.E4.
- Alt, W. (2002). *Nichtlineare Optimierung: Eine Einführung in Theorie, Verfahren und Anwendungen*. Vieweg Studium Aufbaukurs Mathematik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Amano, K., Foster, D. und Lucas, R. J. (2017). „Variation of melanopsin signals in natural scenes“. In: *Colour Group (GB) January Meeting. COLOUR in VISION - Palmer and CRS Lectures. City University London*.

- Ámundadóttir, M. L., Lockley, S. und Andersen, M. (2017). „Unified framework to evaluate non-visual spectral effectiveness of light for human health“. In: *Lighting Research and Technology* 49.6, S. 673–696.
- Anandan, M. (2006). „LED Backlight: Enhancement of picture quality on LCD screen“. In: *Proceedings of ASID 06*. New Delhi, India: Society for Information Display, S. 130–134.
- Aoki, H., Yamada, N., Ozeki, Y., Yamane, H. und Kato, N. (1998). „Minimum light intensity required to suppress nocturnal melatonin concentration in human saliva“. In: *Neuroscience letters* 252.2, S. 91–94.
- Apple (2016). *Night Shift Modus*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Versionsgeschichte_von_iOS#iOS_9.x (besucht am 18.10.2018).
- Armstrong, R. A. (2014). „When to use the Bonferroni correction“. In: *Ophthalmic & physiological optics: the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)* 34.5, S. 502–508.
- Asano, Y., Fairchild, M. D. und Blondé, L. (2013). „Observer variability experiment using a four-primary display and its relationship with physiological factors“. In: *Color and Imaging Conference* 21, S. 171–176.
- ASUS (2015). *EyeCare-Technologie: Ultra-low Blue Light Monitors*. URL: https://www.asus.com/Microsite/display/eye_care_technology/ (besucht am 18.10.2018).
- Aube, M., Roby, J. und Kocifaj, M. (2013). „Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility“. In: *PLOS ONE* 8.7, e67798.
- Baer, R. (2006). *Beleuchtungstechnik: Grundlagen*. 3. Auflage. Berlin: Huss-Medien.
- Bartenbach, C. (2009). *Handbuch für Lichtgestaltung: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen*. Wien: Springer.
- Behar-Cohen, F., Martinsons, C., Viénot, F., Zisis, G., Barlier-Salsi, A., Cesarini, J. P., Enouf, O., Garcia, M., Picaud, S. und Attia, D. (2011). „Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye?“ In: *Progress in Retinal and Eye Research* 30.4, S. 239–257.
- Bellia, L. und Bisegna, F. (2013). „From radiometry to circadian photometry: A theoretical approach“. In: *Building and Environment* 62, S. 63–68.
- Bellia, L., Bisegna, F. und Spada, G. (2011). „Lighting in indoor environments: Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions“. In: *Building and Environment* 46.10, S. 1984–1992.

- BenQ (2013). *Eye-care Monitor: Low Blue Light*. URL: <http://www.benq.de/Microsite/eye-care-monitors/lbl.html> (besucht am 18.10.2018).
- Berg, A. (2015). *Studie zur Nutzung von E-Books*. Berlin. URL: <https://www.bitkom.org/Presse/Anhaenge-an-PIs/2015/10-Oktober/BITKOM-PK-Charts-E-Books-Studie-06-10-2015-final2.pdf> (besucht am 18.10.2018).
- Berns, R. S. (1993). „The mathematical development of CIE TC 1-29 proposed color difference equation: CIELCH“. In: *AIC Colour 93*. Hrsg. von Association Internationale de la Couleur. Bd. Vol. B, S. C19-1-C19-4.
- (2000). *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons.
- Berson, D. M., Dunn, F. A. und Takao, M. (2002). „Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock“. In: *Science* 295.5557, S. 1070–1073.
- Berth, H.k und Balck, F. (2003). *Psychologische Tests für Mediziner*. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Bieske, K. (2010). *Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme: Dissertation*. Bd. Nr. 11. Publikationsreihe / Fachgebiet Lichttechnik TU Ilmenau. Tönning, Lübeck und Marburg: Der Andere Verlag.
- Birren, F. (1961). *Color psychology and color therapy: A factual study of the influence of color on human life*. Secaucus, N.J.: Citadel Press.
- Blankenbach, K. (2016a). „Color“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, S. 3111–3134.
- (2016b). „Luminance, Contrast Ratio, and Gray Scale“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, S. 3089–3109.
- Blask, D. E. (2009). „Melatonin, sleep disturbance and cancer risk“. In: *Sleep medicine reviews* 13.4, S. 257–264.
- Blask, D. E., Wilson, S. T. und Zalatan, F. (1997). „Physiological melatonin inhibition of human breast cancer cell growth in vitro: evidence for a glutathione-mediated pathway“. In: *Cancer Research* 57.10, S. 1909–1914.
- Blehm, C., Vishnu, S., Khattak, A., Mitra, S. und Yee, R. W. (2005). „Computer vision syndrome: A review“. In: *Survey of ophthalmology* 50.3, S. 253–262.

- Bloj, M. und Hedrich, M. (2016). „Color Perception“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, S. 197–205.
- Bodenhausen, G. V. (1990). „Stereotypes as Judgmental Heuristics: Evidence of Circadian Variations in Discrimination“. In: *Psychological Science* 1.5, S. 319–322.
- Bonnefont-Rousselot, D. und Collin, F. (2010). „Melatonin: Action as antioxidant and potential applications in human disease and aging“. In: *Toxicology* 278.1, S. 55–67.
- Borderstep Institut (2018). *Prognose zur Anzahl der installierten Arbeitsplatzcomputer in Deutschland von 2010 bis 2020: zitiert nach de.statista.com*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/199774/umfrage/prognose-zur-anzahl-der-arbeitsplatzcomputer-in-deutschland/> (besucht am 18.10.2018).
- Borisuit, A., Linhart, F., Scartezzini, J-L und Münch, M. (2015). „Effects of realistic office daylighting and electric lighting conditions on visual comfort, alertness and mood“. In: *Lighting Research and Technology* 47.2, S. 192–209.
- Bortz, J. (2008). *Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik: Mit 247 Tabellen*. 3. Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Boyce, P. R. (2014). *Human factors in lighting*. Third edition. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis.
- Boyd, G. (2016a). „LCD Backlights“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, S. 2291–2307.
- Boyd, Gary (2016b). „Optical Enhancement Films“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, S. 2309–2332.
- Brainard, D. H. (2003). „Color Appearance and Color Difference Specification“. In: *The science of color*. Hrsg. von S. K. Shevell. Amsterdam: Elsevier, S. 191–216.
- Brainard, G. C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E. und Rollag, M. D. (2001). „Action spectrum for melatonin regulation in humans: Evidence for a novel circadian photoreceptor“. In: *Journal of Neuroscience* 21.16, S. 6405–6412.
- Brainard, G. C., Lewy, A. J., Menaker, M., Fredrickson, R. H., Miller, L. S., Weleber, R. G., Cassone, V. und Hudson, D. (1988). „Dose-response relationship between light irradiance and the suppression of plasma melatonin in human volunteers“. In: *Brain research* 454.1-2, S. 212–218.

- Brainard, G. C., Rollag, M. D., Hanifin, J. P., van den Beld, G. und Sanford, B. (2000). „The effect of polarized versus nonpolarized light on melatonin regulation in humans“. In: *Photochemistry and photobiology* 71.6, S. 766–770.
- Braun, M., Stefani, O., Pross, A., Bues, M. und Spath, D. (July 2009). „Human Factors in Lighting“. In: *Ergonomics and Health Aspects of Work with Computers*. Hrsg. von B.-T. Karsh. Bd. 5624, Lecture Notes in Computer Science. New York: Springer, S. 223–230.
- Brill, M. H. und Larimer, J. (2005a). „Avoiding on-screen metamerism in N-primary displays“. In: *Journal of the Society for Information Display* 13.6, S. 509–516.
- (2005b). „Color-Matching Issues in Multi-Primary Displays“. In: *Proceedings of the Second Americas Display Engineering and Applications Conference, ADEAC 2005*, S. 119–122.
- (2007). „Metamerism and Multi-Primary Displays“. In: *SID Information Display* 23.6, S. 16–21.
- Brockmann, P. E., Diaz, B., Damiani, F., Villarroel, L., Nunez, F. und Bruni, O. (2016). „Impact of television on the quality of sleep in preschool children“. In: *Sleep medicine* 20, S. 140–144.
- Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A., Musiol, G. und Mühlig, H. (2001). *Taschenbuch der Mathematik*. 5. Aufl. Frankfurt am Main: Harri Deutsch.
- Bues, M., Pross, A. und Stefani, O. (1. Juli 2010). „Anzeigesystem mit circadianer Wirkung auf den Menschen“. Schutzrecht WO2010072415A1. EP. DE202009018852 U1. 2009-12-23.
- Bues, M., Stefani, O. und Pross, A. (2016). „11-1: Invited Paper: Convergence of Lighting and Display: Opportunities, Requirements, Challenges“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 47.1, S. 110–113.
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2011). *Bildschirmarbeit in der Produktion: Sicher, gesund und produktiv gestalten!* 1. Aufl. Dortmund: BAuA. URL: <https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/item/P6BPDHUVF7GYVY70MXTQXAVZ6IW0IXBB> (besucht am 18.10.2018).
- (2014). *Technische Regel für Arbeitsstätten: ASR A3.4 Beleuchtung*. Zweite Änderung GMBI 2014. Dortmund: BAuA. URL: <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/ASR-A3-4.html> (besucht am 18.10.2018).
- Buschendorf, H.-G., Hrsg. (1989). *Licht- und Beleuchtungstechnik*. 1. Aufl. VT-Lexikon. Berlin: Verl. Technik.
- Buysse, D. J., Reynolds, C. F., Monk, T. H., Berman, S. R. und Kupfer, D. J. (1989). „The Pittsburgh Sleep Quality Index: A new instrument for psychiatric practice and research“. In: *Psychiatry research* 28.2, S. 193–213.

- Cajochen, C. (2007). „Alerting effects of light“. In: *Sleep medicine reviews* 11.6, S. 453–464.
- (2009). „Schlafregulation“. In: *Somnologie - Schlafforschung und Schlafmedizin* 13.2, S. 64–71.
- Cajochen, C., Frey, S., Anders, D., Späti, J., Bues, M., Pross, A., Mager, R., Wirz-Justice, A. und Stefani, O. (2011). „Evening exposure to a light emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance“. In: *Journal of Applied Physiology* 110.5, S. 1432–1438.
- Cajochen, C., Zeitzer, J. M., Czeisler, C. A. und Dijk, D.-J. (2000). „Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness“. In: *Behavioural Brain Research* 115.1, S. 75–83.
- Campbell, S. S. und Dawson, D. (1990). „Enhancement of nighttime alertness and performance with bright ambient light“. In: *Physiology & behavior* 48.2, S. 317–320.
- Cao, D., Nicandro, N. und Barrionuevo, P. A. (2015). „A five-primary photostimulator suitable for studying intrinsically photosensitive retinal ganglion cell functions in humans“. In: *Journal of vision* 15.1, S. 15.1.27.
- Centore, P. und Brill, M. H. (2012). „Extensible multi-primary control sequences“. In: *Journal of the Society for Information Display* 20.1, S. 12–21.
- Chamorro, E., Bonnin-Arias, C., Pérez-Carrasco, M. J., Muñoz de Luna, J., Vázquez, D. und Sánchez-Ramos, C. (2013). „Effects of light-emitting diode radiations on human retinal pigment epithelial cells in vitro“. In: *Photochemistry and photobiology* 89.2, S. 468–473.
- Chan, C.-C. et al. (2007). „Development of Multi-Primary Color LCD“. In: *IDMC'07*. Hsinchu, Taiwan: Society for Information Display, Taipei Chapter, S. 888.
- Chang, A.-M., Aeschbach, D., Duffy, J. F. und Czeisler, C. A. (2014). „Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112.4, S. 1232–1237.
- Chao, P. C.-P., Shen, C.-Y., Chiu, C.-W., Huang, J.-S., Kao, Y.-Y., Tu, T.-Y., Wang, C.-L., Chi, Solomon, Lin, H.-W. und Tsai, S.-Y. (2008). „A novel lens cap designed for the RGB LEDs installed in an ultra-thin and directly lit backlight unit of large-sized LCD TVs“. In: *Journal of the Society for Information Display* 16.2, S. 317.
- Chellappa, S. L., Steiner, R., Oelhafen, P., Lang, D., Götz, T., Krebs, J. und Cajochen, C. (2013). „Acute exposure to evening blue-enriched light impacts on human sleep“. In: *Journal of Sleep Research* 22.5, S. 573–580.

- Chellappa, S. L. et al. (2012). „Human melatonin and alerting response to blue-enriched light depend on a polymorphism in the clock gene PER3“. In: *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 97.3, E433–7.
- Chen, Hai-Wei, Zhu, Rui-Dong, He, Juan, Duan, Wei, Hu, Wei, Lu, Yan-Qing, Li, Ming-Chun, Lee, Seok-Lyul, Dong, Ya-Jie und Wu, Shin-Tson (2017). „Going beyond the limit of an LCD’s color gamut“. In: *Light: Science & Applications* 6.9, e17043.
- Cheung, V. (2016). „Uniform Color Spaces“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, S. 188–196.
- Chorin, M. B. und Eliav, D. (2007). „Multi-primary design of spectrally accurate displays“. In: *Journal of the Society for Information Display* 15.9, S. 667–677.
- Chorin, M. B., Eliav, D., Roth, S., Pagi, A. und Ben-David, I. (2007). „New Metric for Display Color Gamut Evaluation“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 38.1, S. 1053–1056.
- Christensen, M. A., Bettencourt, L., Kaye, L., Moturu, S. T., Nguyen, K. T., Olgin, J. E., Pletcher, M. J. und Marcus, G. M. (2016). „Direct Measurements of Smartphone Screen-Time: Relationships with Demographics and Sleep“. In: *PLOS ONE* 11.11, e0165331.
- CIE (1972). *Special metamerism index: Change in illuminant*. Bd. Supplement No. 1 to CIE Publication No. 15-1971. Paris: CIE Central Bureau.
- (1989). *Special metamerism index: Change in observer*. Bd. 80-1989. CIE technical report. Vienna, Austria: CIE Central Bureau.
- (1995). *Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources*. Bd. 13.3. CIE. Vienna, Austria: CIE Central Bureau.
- (2001). *Improvement to industrial colour-difference evaluation*. Bd. 142-2001. CIE technical report. Vienna, Austria: CIE Central Bureau.
- (2004). *Colorimetry*. 3rd Edition. Bd. 15:2004. CIE technical report. Vienna, Austria: CIE Central Bureau.
- (2006). *Fundamental chromaticity diagram with physiological axes: Part 1*. Bd. 170-1. CIE technical report. Vienna: CIE Central Bureau.
- Hrsg. (2015). *Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry: CIE TN 003:2015*. CIE technical note. Vienna, Austria: CIE Central Bureau.

- Coe-Sullivan, S. (2016). „20-1: Invited Paper : The Quantum Dot Revolution: Marching Towards the Mainstream“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 47.1, S. 239–240.
- Cohen, J. B. und Kappauf, W. E. (1982). „Metameric Color Stimuli, Fundamental Metamers, and Wyszecki’s Metameric Blacks“. In: *The American Journal of Psychology* 95.4, S. 537–564.
- Consumer und Home Electronics (2017). *Umsatz mit PC-Monitoren auf dem Konsumentenmarkt in Deutschland von 2005 bis zum 1. Halbjahr 2017: zitiert nach de.statista.com*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28300/umfrage/umsatz-durch-monitore-seit-2005/> (besucht am 18.10.2018).
- (2018). *Durchschnittspreis für PC-Monitore in Deutschland von 2005 bis 2017 (in Euro): zitiert nach de.statista.com*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28299/umfrage/durchschnittspreise-fuer-monitore-seit-2005/> (besucht am 18.10.2018).
- Cos, S., González, A., Martínez-Campa, C., Mediavilla, M. D., Alonso-González, C. und Sánchez-Barceló, E. J. (2006). „Estrogen-signaling pathway: A link between breast cancer and melatonin oncostatic actions“. In: *Cancer detection and prevention* 30.2, S. 118–128.
- Czeisler, C. A., Shanahan, T. L., Klerman, E. B., Martens, H., Brotman, D. J., Emens, J. S., Klein, T. und Rizzo, J. F. (1995). „Suppression of melatonin secretion in some blind patients by exposure to bright light“. In: *The New England journal of medicine* 332.1, S. 6–11.
- Czeisler, C. A. et al. (1999). „Stability, precision, and near-24-hour period of the human circadian pacemaker“. In: *Science* 284.5423, S. 2177–2181.
- Daan, S. (2010). „A History of Chronobiological Concepts“. In: *The circadian clock*. Hrsg. von U. Albrecht. Protein reviews. New York: Springer, S. 1–35.
- Dacey, D. M., Liao, H.-W., Peterson, B. B., Robinson, F. R., Smith, V. C., Pokorny, J., Yau, K.-W. und Gamlin, P. D. (2005). „Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN“. In: *Nature* 433.7027, S. 749–754.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV (2015). *Bildschirm- und Büroarbeitsplatz: Leitfaden für die Gestaltung*. Hrsg. von DGUV. URL: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/215-410.pdf> (besucht am 18.10.2018).

- Deutsches Institut für Normung e.V. (2000-12-01). „Multimediasysteme und -geräte - Farbmessung und Farbmanagement - Teil 4: Geräte mit Flüssigkristallanzeigen“. Norm DIN EN 61966-4 (Berlin).
- (2014-10-01a). „Farbmessung – Teil 7: Messbedingungen für Körperfarben“. Norm DIN 5033-7 (Berlin).
 - (2014-10-01b). „Metamerie-Index von Probenpaaren bei Lichtartwechsel“. Norm DIN 6172 (Berlin).
 - (2013-04-01). „Biologisch wirksame Beleuchtung – Planungsempfehlungen“. Spezifikation DIN SPEC 67600 (Berlin).
 - (2017-10-01). „Farbmessung – Teil 1: Grundbegriffe der Farbmeterik“. Norm DIN 5033-1 (Berlin).
 - (2012-06-01). „Farbmeterik - Teil 4: CIE 1976 L*a*b* Farbenraum“. Norm DIN EN ISO 11664-4 (Berlin).
 - (2017-01-01). „Farbmeterik - Teil 5: CIE 1976 L*u*v*-Farbenraum und gleichabständige u', v'-Farbtafel“. Norm DIN EN ISO 11664-5 (Berlin).
 - (2011-08-01). „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen“. Norm DIN EN 12464-1 (Berlin).
 - (2018-12-01). „Licht und Beleuchtung - Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung“. Norm DIN EN 12665 (Berlin).
 - (2009-03-01). „Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen“. Norm DIN EN 62471 (Berlin).
 - (2015-08-01). „Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren“. Spezifikation DIN SPEC 5031-100 (Berlin).
 - (2009-06-01). „Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren“. Vornorm DIN V 5031-100 (Berlin).
 - (1976-01-01). „Farbwiedergabe; Allgemeine Begriffe“. Norm DIN 6169-1 (Berlin).
- Duffy, J. F. und Wright, K. P. (2005). „Entrainment of the human circadian system by light“. In: *Journal of Biological Rhythms* 20.4, S. 326–338.
- Ecker, J. L., Dumitrescu, O. N., Wong, K. Y., Alam, N. M., Chen, S.-K., LeGates, T., Renna, J. M., Prusky, G. T., Berson, D. M. und Hattar, S. (2010). „Melanopsin-expressing retinal ganglion-cell photoreceptors: Cellular diversity and role in pattern vision“. In: *Neuron* 67.1, S. 49–60.

- Eichhorst, W. und Tobsch, V. (2014). *Flexible Arbeitswelten: Bericht an die Expertenkommission „Arbeits- und Lebensperspektiven in Deutschland“*. Hrsg. von Detlef Hollmann. Gütersloh. URL: <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/flexible-arbeitswelten/> (besucht am 18.10.2018).
- Eliav, D., Roth, S. und Chorin, M. B. (2006). „Application Driven Design of Multi-Primary Displays“. In: *Color and Imaging Conference 2006.1*, S. 280–285.
- Enezi, J. a., Revell, V., Brown, T., Wynne, J., Schlangen, L. und Lucas, R. J. (2011). „A "melanopic" spectral efficiency function predicts the sensitivity of melanopsin photoreceptors to polychromatic lights“. In: *Journal of Biological Rhythms* 26.4, S. 314–323.
- Erdem, T. und Demir, H. V. (2018). „Color-Enrichment Semiconductor Nanocrystals for Biorhythm-Friendly Backlighting“. In: *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 232.9-11, S. 1457–1468.
- Erren, T. C., Pape, H. G., Reiter, R. J. und Piekarski, C. (2008). „Chronodisruption and cancer“. In: *Die Naturwissenschaften* 95.5, S. 367–382.
- Estévez, O. und Spekreijse, H. (1982). „The “silent substitution” method in visual research“. In: *Vision Research* 22.6, S. 681–691.
- Exelmans, L. und van den Bulck, J. (2016). „Bedtime mobile phone use and sleep in adults“. In: *Social Science & Medicine* 148, S. 93–101.
- Fairchild, M. D. (2013). *Color appearance models*. Third edition. Wiley-IS & T series in imaging science and technology. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
- Fairchild, M. D. und Wyble, D. R. (2007). „Mean Observer Metamerism and the Selection of Display Primaries“. In: *15th Color and Imaging Conference, CIC15*. IS&T - The Society for Imaging Science and Technology, S. 151–159.
- Fedorovskaya, E. A., Ridder, H. de und Blommaert, F. J. J. (1997). „Chroma variations and perceived quality of color images of natural scenes“. In: *Color Research & Application* 22.2, S. 96–110.
- Fernandez, D. C. et al. (2018). „Light Affects Mood and Learning through Distinct Retina-Brain Pathways“. In: *Cell* 175.1, P71–84.E18.
- Figueiro, M. G., Bierman, A., Plitnick, B. und Rea, M. S. (2009). „Preliminary evidence that both blue and red light can induce alertness at night“. In: *BMC neuroscience* 10.1, S. 105.
- Figueiro, M. G., Bullough, J. D., Parsons, R. H. und Rea, M. S. (2005). „Preliminary evidence for a change in spectral sensitivity of the circadian system at night“. In: *Journal of circadian rhythms* 3, S. 14.

- Figueiro, M. G., Nonaka, S. und Rea, M. S. (2014). „Daylight exposure has a positive carryover effect on nighttime performance and subjective sleepiness“. In: *Lighting Research and Technology* 46.5, S. 506–519.
- Figueiro, M. G. und Overington, D. (2016). „Self-luminous devices and melatonin suppression in adolescents“. In: *Lighting Research and Technology* 48.8, S. 966–975.
- Figueiro, M. G., Wood, B., Plitnick, B. und Rea, M. S. (2011). „The impact of light from computer monitors on melatonin levels in college students“. In: *Neuro endocrinology letters* 32.2, S. 158–163.
- (2013). „The impact of watching television on evening melatonin levels“. In: *Journal of the Society for Information Display* 21.10, S. 417–421.
- Flammer, J., Mozaffarieh, M. und Bebie, H. (2013). *Basic Sciences in Ophthalmology: Physics and Chemistry*. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Flux Software LLC (2018). *f.lux: Software to make your life better*. URL: <https://justgetflux.com/> (besucht am 18.10.2018).
- Fossum, I. N., Nordnes, L. T., Storemark, S. S., Bjorvatn, B. und Pallesen, S. (2014). „The association between use of electronic media in bed before going to sleep and insomnia symptoms, daytime sleepiness, morningness, and chronotype“. In: *Behavioral sleep medicine* 12.5, S. 343–357.
- Foster, R. G. und Roenneberg, T. (2008). „Human responses to the geophysical daily, annual and lunar cycles“. In: *Current biology: CB* 18.17, R784–R794.
- Frings, S. und Müller, F. (2014). *Biologie der Sinne: Vom Molekül zur Wahrnehmung*. Sachbuch. Heidelberg: Springer Spektrum.
- Fujitsu (2018). *P27T-7 UHD: Datenblatt*. URL: <https://sp.ts.fujitsu.com/dmsp/Publications/public/ds-display-p27t-7-uhd-de.pdf> (besucht am 18.10.2018).
- Gall, D. (2002). „Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung“. In: *LICHT* 54, S. 1292–1297.
- Gall, D. und Bieske, K. (2004). „Definition and measurement of circadian radiometric quantities“. In: *Light and health: Non-visual effects*. Hrsg. von CIE. Vienna, Austria: CIE Central Bureau, S. 129–132.
- Garhart, C. und Lakshminarayanan, V. (2016). „Anatomy of the Eye“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, S. 93–104.

- Glickman, G., Hanifin, J. P., Rollag, M. D., Wang, J., Cooper, H. und Brainard, G. C. (2003). „Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans“. In: *Journal of Biological Rhythms* 18.1, S. 71–79.
- Gooley, J. J., Mien, I. H., St. Hilaire, M. A., Yeo, S.-C., Chua, E. C.-P., van Reen, E., Hanley, C. J., Hull, J. T., Czeisler, C. A. und Lockley, S. W. (2012). „Melanopsin and Rod–Cone Photoreceptors Play Different Roles in Mediating Pupillary Light Responses during Exposure to Continuous Light in Humans“. In: *The Journal of Neuroscience* 32.41, S. 14242–14253.
- Gooley, J. J., Rajaratnam, S. M. W., Brainard, G. C., Kronauer, R. E., Czeisler, C. A. und Lockley, S. W. (2010). „Spectral responses of the human circadian system depend on the irradiance and duration of exposure to light“. In: *Science Translational Medicine* 2.31, 31ra33.
- Gradisar, M., Wolfson, A. R., Harvey, A. G., Hale, L., Rosenberg, R. und Czeisler, C. A. (2013). „The sleep and technology use of Americans: Findings from the National Sleep Foundation’s 2011 Sleep in America poll“. In: *Journal of clinical sleep medicine: JCSM: official publication of the American Academy of Sleep Medicine* 9.12, S. 1291–1299.
- Graßmann, H. (1853). „Zur Theorie der Farbenmischung“. In: *Annalen der Physik und Chemie*. Hrsg. von J. C. Poggendorf. Annalen der Physik und Chemie. Leipzig: Johann Ambrosius Barth, S. 69–84.
- Green, A., Cohen-Zion, M., Haim, A. und Dagan, Y. (2017). „Evening light exposure to computer screens disrupts human sleep, biological rhythms, and attention abilities“. In: *Chronobiology International* 34.7, S. 855–865.
- Green, P. und MacDonald, L. W. (2002). *Colour engineering: Achieving Device Independent Colour*. Wiley SID series in display technology. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- Gronfier, C., Wright, K. P., Kronauer, R. E. und Czeisler, C. A. (2007). „Entrainment of the human circadian pacemaker to longer-than-24-h days“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104.21, S. 9081–9086.
- Grønli, J., Byrkjedal, K. I., Bjorvatn, B., Nødtvedt, Ø.n, Hamre, B. und Pallesen, S. (2016). „Reading from an iPad or from a book in bed: The impact on human sleep. A randomized controlled crossover trial“. In: *Sleep medicine* 21, S. 86–92.
- Guild, J. (1932). „The Colorimetric Properties of the Spectrum“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 230.681-693, S. 149–187.
- Güler, A. D., Altimus, C. M., Ecker, J. L. und Hattar, S. (2007). „Multiple photoreceptors contribute to nonimage-forming visual functions predominantly through

- melanopsin-containing retinal ganglion cells“. In: *Cold Spring Harbor symposia on quantitative biology* 72, S. 509–515.
- Halberg, F. (1959). „Susceptibility to ouabain and physiologic circadian periodicity“. In: *Proc Minn Acad Sci USA* 27, S. 139–143.
- Halberg, F. et al. (2003). „Transdisciplinary unifying implications of circadian findings in the 1950s“. In: *Journal of circadian rhythms* 1.1, S. 2.
- Haner, U.-E., Kelter, J., Bauer, W. und Rief, S. (2009). „Increasing information worker productivity through information work infrastructure“. In: *Ergonomics and health aspects of work with computers. International conference, EHAWC 2009*. Berlin: Springer, S. 39–48.
- Harbers, G. und Hoelen, C. (2001). „LP-2: High Performance LCD Backlighting using High Intensity Red, Green and Blue Light Emitting Diodes“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 32.1, S. 702.
- Hardeland, R., Pandi-Perumal, S. R. und Cardinali, D. P. (2006). „Melatonin“. In: *The international journal of biochemistry & cell biology* 38.3, S. 313–316.
- Hatori, M. und Panda, S. (2010). „The emerging roles of melanopsin in behavioral adaptation to light“. In: *Trends in molecular medicine* 16.10, S. 435–446.
- Hattar, S. (2002). „Melanopsin-Containing Retinal Ganglion Cells: Architecture, Projections, and Intrinsic Photosensitivity“. In: *Science* 295.5557, S. 1065–1070.
- Heath, M., Sutherland, C., Bartel, K., Gradisar, M., Williamson, P., Lovato, N. und Micic, G. (2014). „Does one hour of bright or short-wavelength filtered tablet screenlight have a meaningful effect on adolescents’ pre-bedtime alertness, sleep, and daytime functioning?“ In: *Chronobiology International* 31.4, S. 496–505.
- Hébert, M., Martin, S. K., Lee, C. und Eastman, C. I. (2002). „The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans“. In: *Journal of Pineal Research* 33.4, S. 198–203.
- Heo, J.-Y. et al. (2017). „Effects of smartphone use with and without blue light at night in healthy adults: A randomized, double-blind, cross-over, placebo-controlled comparison“. In: *Journal of psychiatric research* 87, S. 61–70.
- Hering, E. (1964). *Outlines of a Theory of the Light Sense*. Harvard University Press.
- Hettinger, S., Co-Betreuer: Pross, A. und Betreuer: Hellmuth, T. (2018-03-31). „Ergonomische und melanopische Bewertung von Displaysystemen mit reduziertem Blaulicht“. Bachelorarbeit. Aalen: Hochschule Aalen.

- Higuchi, S., Motohashi, Y., Liu, Y., Ahara, M. und Kaneko, Y. (2003). „Effects of VDT tasks with a bright display at night on melatonin, core temperature, heart rate, and sleepiness“. In: *Journal of Applied Physiology* 94.5, S. 1773–1776.
- Hill, B. (1999). „Color capture, color management, and the problem of metamerism: Does multispectral imaging offer the solution?“ In: *Proc. SPIE 1999*. Hrsg. von R. Eschbach und G. G. Marcu. Bd. 3963. SPIE Proceedings. SPIE, S. 2–14.
- (2001). „Optimization of total multispectral imaging systems: Best spectral match versus least observer metamerism“. In: Hrsg. von R. Chung und A. Rodrigues. SPIE Proceedings. SPIE, S. 481.
- Hippius, H., Rüter, H. und Schmauß, M. (1988). *Schlaf-Wach-Funktionen*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hoffmann, G., Leichtfried, V., Griesmacher, A., Bartenbach, C., Canazei, M., Staggl, S. und Schobersberger, W. (2008). „Effects of Light With Reduced Short Wavelength Components on Parameters of Circadian Rhythm and Performance in an Experimental Night Shift Model“. In: *The Open Physiology Journal* 1.1, S. 34–43.
- Hong, B. H. (2009). „Notebook PC / Monitor Backlights“. In: *LCD backlights*. Hrsg. von S. Kobayashi, S. Mikoshiba und S. Lim. Wiley-SID series in display technology. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, S. 61–71.
- Hunt, R. W. G. (1952). „Light and Dark Adaptation and the Perception of Color*“. In: *Journal of the Optical Society of America* 42.3, S. 190.
- (2004). *The reproduction of colour*. 6th Edition. Wiley-IS&T series in imaging science and technology. Chichester: John Wiley & Sons.
- Hurvich, L. M. und Jameson, D. (1955). „Some Quantitative Aspects of an Opponent-Colors Theory II Brightness, Saturation, and Hue in Normal and Dichromatic Vision“. In: *Journal of the Optical Society of America* 45.8, S. 602.
- IDC Research, Inc. (2018). *Absatz von PC-Monitoren weltweit vom 1. Quartal 2012 bis zum 4. Quartal 2017 (in Millionen Stück): zitiert nach de.statista.com*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/274406/umfrage/absatz-von-pc-monitoren-weltweit-nach-quartalen/> (besucht am 18.10.2018).
- IHS Technologie (2015). *Desktop Monitor Market Tracker*. Hrsg. von IHS Inc. URL: <https://technology.ihs.com/api/binary/546503?> (besucht am 18.10.2018).
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1998). „Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)“. In: *Health physics* 74.4, S. 494–522.

- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2000). „Statement on light-emitting diodes (LEDs) and laser diodes: Implications for Hazard assessment“. In: *Health physics* 78.6, S. 744–752.
- International Telecommunication Union (2015-10-01). „Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange“. ITU-R BT.2020-2 (2018-06-18).
- (2015-06-01). „Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange“. ITU-R BT.709-6 (2016-06-08).
- Ishihara, S. (1972). *The series of plates designed as a tests for colour blindness: 24 plates*. Tokio, Kyoto: Kanehara Shuppan Co., Ltd.
- Ishiwatari, Y. (2009a). „Light-guide Plates“. In: *LCD backlights*. Hrsg. von S. Kobayashi, S. Mikoshiba und S. Lim. Wiley-SID series in display technology. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, S. 235–250.
- (2009b). „Optical Diffuser Plates“. In: *LCD backlights*. Hrsg. von S. Kobayashi, S. Mikoshiba und S. Lim. Wiley-SID series in display technology. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, S. 251–256.
- ISO (2018). „Light and lighting - Integrative lighting - Non-visual effects“. Preparatory ISO/NP TR 21783 (2018-10-18). URL: <https://www.iso.org/standard/71623.html>.
- (2010-12-01). „Image technology colour management – Architecture, profile format and data structure – Part 1: Based on ICC.1:2010“. Norm ISO 15076-1:2010 (Genf).
- (2017-07-01). „Graphische Technik - Spektrale Messung und farbmtrische Berechnung für graphische Objekte“. Norm ISO 13655.
- Jager, R. D., Mieler, W. F. und Miller, J. W. (2008). „Age-related macular degeneration“. In: *The New England journal of medicine* 358.24, S. 2606–2617.
- Johnson, G. M. (2015). „Color appearance phenomena and visual illusions“. In: *Handbook of color psychology*. Hrsg. von A. J. Elliot, M. D. Fairchild und A. Franklin. Cambridge handbooks in psychology. Cambridge: Cambridge University Press, S. 679–702.
- Jones, M. J., Peeling, P., Dawson, B., Halson, S., Miller, J., Dunican, I., Clarke, M., Goodman, C. und Eastwood, P. (2018). „Evening electronic device use: The effects on alertness, sleep and next-day physical performance in athletes“. In: *Journal of sports sciences* 36.2, S. 162–170.
- Jouvet, M., Mouret, J., Chouvet, G. und Siffre, M. (1974). „Toward a 48-hour day: experimental bicircadian rhythms in man“. In: *The neurosciences*. Hrsg. von F. O. Schmitt. Cambridge: MIT Press, S. 491–497.

- Judd, D. B. und Wyszecki, G. (1975). *Color in business, science and industry*. 3. ed. Wiley series in pure and applied optics / Stanley S. Ballard. New York: Wiley.
- Kakizaki, M., Kuriyama, S., Sone, T., Ohmori-Matsuda, K., Hozawa, A., Nakaya, N., Fukudo, S. und Tsuji, I. (2008). „Sleep duration and the risk of breast cancer: the Ohsaki Cohort Study“. In: *British Journal of Cancer* 99.9, S. 1502–1505.
- Kaplan, R. M. und Saccuzzo, D. P. (2017). *Psychological testing: Principles, applications, & issues*. 9th Edition. Australia: Wadsworth, Cengage Learning.
- Kelley, E. F. (2011). „64-1: Invited Paper: The New Information Display Measurements Standard - a Display Metrology Document“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 42.1, S. 950–953.
- Kelter, J. (2014). *Wahrgenommene Lichtqualität im Büro: Phase 1: Auswertung Europa*. Zumtobel research. Dornbirn: Zumtobel. URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-316018.html> (besucht am 18.10.2018).
- Kim, H., Kim, H.-s., Jung, C.-H. und Yoon, I. (2015). „A Method for Reducing Blue Light Hazard from White Light-emitting Diodes Using Colourimetric Characterization of the Display“. In: *International Journal of Control and Automation* 8.6, S. 9–18.
- Kobayashi, S., Mikoshiba, S. und Lim, S., Hrsg. (2009). *LCD backlights*. Wiley-SID series in display technology. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons.
- Koenig, F., Ohsawa, K., Yamaguchi, M., Ohyama, N. und Hill, B. (2001). „Multiprimary display: Discounting observer metamerism“. In: Hrsg. von R. Chung und A. Rodrigues. Bd. 4421. SPIE Proceedings. SPIE, S. 898–901.
- Konopka, R. J. und Benzer, S. (1971). „Clock mutants of *Drosophila melanogaster*“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 68.9, S. 2112–2116.
- Kramer, A. und Merrow, M., Hrsg. (2013). *Circadian Clocks*. Handbook of Experimental Pharmacology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kroetz, S., Pross, A. und Stefani, O. (2016). „Wirkung von dynamischer Beleuchtung auf Herzratenvariabilität und Wohlbefinden“. In: *LICHT 2016*. Hrsg. von Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. KIT Scientific Publishing, S. 181–186.
- Lafrance, C., Dumont, M., Lespérance, P. und Lambert, C. (1998). „Daytime vigilance after morning bright light exposure in volunteers subjected to sleep restriction“. In: *Physiology & behavior* 63.5, S. 803–810.
- Laird, J. und Heynderickx, I. (2008). „Perceptually optimal boundaries for wide gamut TVs“. In: *Electronic Imaging 2008*. Hrsg. von R. Eschbach, G. G. Marcu und S. Tominaga. SPIE Proceedings. SPIE, S. 680709-680709-10.

- Lang, D. (3. Okt. 2016). *Human Centric Lighting: Daylight-Related Metrics as prerequisite for assessment of light quality and for lighting design*. Hrsg. von lightingforpeople. Brüssel. URL: <http://lightingforpeople.eu/2016/wp-content/uploads/2016/10/Day-light-related-metrics-for-human-centric-lighting.pdf> (besucht am 20.10.2018).
- Larson, J., Jessen, R. E., Uz, T., Arslan, A. D., Kurtuncu, M., Imbesi, M. und Manev, H. (2006). „Impaired hippocampal long-term potentiation in melatonin MT2 receptor-deficient mice“. In: *Neuroscience letters* 393.1, S. 23–26.
- Lasko, T. A., Kripke, D. F. und Elliot, J. A. (1999). „Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields“. In: *Journal of Biological Rhythms* 14.2, S. 122–125.
- Lebowsky, F. und Vonneilich, K. (2008). *Multi-primary display architecture using pre-emphasis*. URL: https://www.stmicroelectronics.com.cn/content/ccc/resource/sales_and_marketing/promotional_material/magazine/8b/96/b4/6f/fb/90/4e/ca/TP%20899%20fkt2008_en_20080709.pdf/files/TP%20899%20fkt2008_en_20080709.pdf/jcr:content/translations/en.TP%20899%20fkt2008_en_20080709.pdf (besucht am 20.10.2018).
- Lee, S. Y. (2009). „Technical Trends and Requirements / Specifications for LCD TV Backlights“. In: *LCD backlights*. Hrsg. von S. Kobayashi, S. Mikoshiba und S. Lim. Wiley-SID series in display technology. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, S. 3–20.
- Levenberg, K. (1944). „A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares“. In: *Quarterly of Applied Mathematics* 2.2, S. 164–168.
- Lewy, A. J., Wehr, T. A., Goodwin, F. K., Newsome, D. A. und Markey, S. P. (1980). „Light suppresses melatonin secretion in humans“. In: *Science* 210.4475, S. 1267–1269.
- Linné, C. v. und Freer, S. (2007). *Linnaeus' Philosophia Botanica*. 1st engl. ed., reprinted 2007. Oxford: Oxford University Press.
- Long, D. und Fairchild, M. D. (2011). „Optimizing Spectral Color Reproduction in Multiprimary Digital Projection“. In: *19th Color and Imaging Conference, CIC 2011*. IS&T - The Society for Imaging Science and Technology, S. 290–297.
- Lucas, R. J. und Allen, A. E. (17. Aug. 2017). „Improvements in image formation“. Schutzrecht WO 2017137756 A1. EP. PCT/GB2017/050338. 2017-02-09.
- Lucas, R. J., Douglas, R. H. und Foster, R. G. (2001). „Characterization of an ocular photopigment capable of driving pupillary constriction in mice“. In: *Nature neuroscience* 4.6, S. 621–626.

- Lucas, R. J. et al. (2014). „Measuring and using light in the melanopsin age“. In: *Trends in neurosciences* 37.1, S. 1–9.
- MacAdam, D. L. (1942). „Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight*“. In: *Journal of the Optical Society of America* 32.5, S. 247.
- Maier D., Co-Betreuer: Pross, A. und Betreuer: Nolting, J. (2017-10-24). „Konzipierung und Durchführung eines Farbwahrnehmungstests an Displaysystemen mit variablem Lichtspektrum“. Masterarbeit. Aalen: Hochschule Aalen.
- Maierova, L., Borisuit, A., Scartezzini, J-L, Jaeggi, S. M., Schmidt, C. und Münch, M. (2016). „Diurnal variations of hormonal secretion, alertness and cognition in extreme chronotypes under different lighting conditions“. In: *Scientific reports* 6, S. 33591.
- Marimont, D. H. und Wandell, B. A. (1994). „Matching color images: The effects of axial chromatic aberration“. In: *Journal of the Optical Society of America A* 11.12, S. 3113–3122.
- Marquardt, D. W. (1963). „An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters“. In: *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 11.2, S. 431–441.
- McKinsey (2011). *Prognose zum globalen Marktanteil von LEDs nach Bereich in den Jahren 2011 bis 2020: zitiert nach de.statista.com*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/316165/umfrage/prognose-zum-globalen-marktanteil-von-leds-nach-bereich/> (besucht am 20.05.2018).
- Merziger, G. und Wirth, T. (2006). *Repetitorium der höheren Mathematik*. 5. Aufl. Springer: Binomi.
- Microsoft (2017). *Windows 10 Nachtmodus*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Windows_10 (besucht am 18.10.2018).
- Mills, P. R., Tomkins, S. C. und Schlangen, L. J. M. (2007). „The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance“. In: *Journal of circadian rhythms* 5, S. 2.
- Mitchell, D. E. und Rushton, W. A. (1971a). „The red-green pigments of normal vision“. In: *Vision Research* 11.10, S. 1045–1056.
- (1971b). „Visual pigments in dichromats“. In: *Vision Research* 11.10, S. 1033–1043.
- Moore, K. (2012). *Zemax 12: Release 2: Radiant Zemax LLC. Windows x64*. URL: <http://www.radiantzemax.com/> (besucht am 18.10.2018).
- Munsell, A. H. (1905). *A Color Notation*. G. H. Ellis Company.

- Murakami, Y., Ishii, J.-i., Obi, T., Yamaguchi, M. und Ohyama, N. (2004). „Color conversion method for multi-primary display for spectral color reproduction“. In: *Journal of Electronic Imaging* 13.4, S. 701.
- Nagare, R., Plitnick, B. und Figueiro, M. G. (2018). „Does the iPad Night Shift mode reduce melatonin suppression?“ In: *Lighting Research and Technology* 51.3, S. 373–383.
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric theory*. 2. ed. McGraw-Hill series in psychology. New York: McGraw-Hill.
- Oh, J. H., Yoo, H., Park, H. K. und Do, Y. R. (2015). „Analysis of circadian properties and healthy levels of blue light from smartphones at night“. In: *Scientific reports* 5, S. 11325.
- Ostwald, W. (1919). *Physikalische Farbenlehre*. Vol. 2. Die Farbenlehre. Leipzig: Unesma.
- Parker, D. C., Pekary, A. E. und Hershman, J. M. (1976). „Effect of normal and reversed sleep-wake cycles upon nyctohemeral rhythmicity of plasma thyrotropin: Evidence suggestive of an inhibitory influence in sleep“. In: *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 43.2, S. 318–329.
- Pechacek, C. S., Andersen, M. und Lockley, S. W. (2008). „Preliminary Method for Prospective Analysis of the Circadian Efficacy of (Day)Light with Applications to Healthcare Architecture“. In: *LEUKOS* 5.1, S. 1–26.
- Philips (2015). *SoftBlue Technologie*. URL: <http://www.mmd-p.com/emea-monitors-philips-softblue-displays-protect-eyes-without-sacrificing-colour/> (besucht am 13.04.2018).
- Planck, M. (1914). *The Theory of Heat Radiation*. Philadelphia: P. Blakiston's Son & Co.
- Plitnick, B., Figueiro, M. G., Wood, B. und Rea, M. S. (2010). „The effects of red and blue light on alertness and mood at night“. In: *Lighting Research and Technology* 42.4, S. 449–458.
- Porsch, T., Blankenhagen, C. und Gall, D. (2004). „Experimentelle Bestimmung der circadianen Lichtwirkung von Monitoren und TV-Bildschirmen“. In: *Tagungsband Licht 2004*. Hrsg. von Lichttechnische Gesellschaft. Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. (LiTG).
- Pospeschill, M. (2006). *Statistische Methoden: Strukturen, Grundlagen, Anwendungen in Psychologie und Sozialwissenschaften*. 1. Aufl. München: Elsevier Spektrum Akad. Verl.
- Pross, A., Gross, A., Sadlers, J., Stefani, O. und Bues, M. (2017). „Display light and its relevance in office environments“. In: *Proceedings of EuroDisplay 2017, Berlin*. Hrsg. von IOP Optical Group and the Society for Information Displays, S. 109–110.

- Pross, A., Stefani, O., Bossenmaier, S. und Bues, M. (1. Jan. 2015). *LightWork. Benutzerakzeptanz und Energieeffizienz von LED-Beleuchtung am Wissensarbeitsplatz: Eine Studie des Fraunhofer IAO LightFusionLab*. Hrsg. von W. Bauer. Stuttgart. URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-343420.html>.
- Provencio, I., Rodriguez, I. R., Jiang, G., Hayes, W. P., Moreira, E. F. und Rollag, M. D. (2000). „A novel human opsin in the inner retina“. In: *The Journal of Neuroscience* 20.2, S. 600–605.
- Python Software Foundation (2018). *Python*. URL: <https://www.python.org/> (besucht am 20.10.2018).
- Qiao, B., Mou, X. und Mou, T. (2016). „P-65: Photobiological Safety Classification and Measurement for Electronic Display Devices“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 47.1, S. 1377–1380.
- Ramanath, R. (2009). „Minimizing observer metamerism in display systems“. In: *Color Research & Application* 34.5, S. 391–398.
- Rångtell, F. H., Ekstrand, E., Rapp, L., Lagermalm, A., Liethof, L., Búcaro, M. O., Lingfors, D., Broman, J.-E., Schioth, H. B. und Benedict, C. (2016). „Two hours of evening reading on a self-luminous tablet vs. reading a physical book does not alter sleep after daytime bright light exposure“. In: *Sleep medicine* 23, S. 111–118.
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bierman, A. und Bullough, J. D. (2010). „Circadian light“. In: *Journal of circadian rhythms* 8.1, S. 2.
- Rea, M. S., Figueiro, M. G. und Bullough, J. D. (2002). „Circadian photobiology: An emerging framework for lighting practice and research“. In: *Lighting Research and Technology* 34.3, S. 177–190.
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bullough, J. D. und Bierman, A. (2005). „A model of phototransduction by the human circadian system“. In: *Brain research. Brain research reviews* 50.2, S. 213–228.
- Rea, M. und Figueiro, M. (2018). „Light as a circadian stimulus for architectural lighting“. In: *Lighting Research and Technology* 50.4, S. 497–510.
- Rea, M., Figueiro, M., Bierman, A. und Hamner, R. (2012). „Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system“. In: *Lighting Research and Technology* 44.4, S. 386–396.
- Reiter, R. J., Tan, D.-X. und Allegra, M. (2002). „Melatonin: Reducing molecular pathology and dysfunction due to free radicals and associated reactants“. In: *Neuro endocrinology letters* 23 Suppl 1, S. 3–8.
- Revell, V. L., Arendt, J., Fogg, L. F. und Skene, D. J. (2006). „Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths“. In: *Neuroscience letters* 399.1-2, S. 96–100.

- Richmond Products Inc. (Mai 2006). *Farnsworth D-15 and Lanthony Test Instructions*. 4400 Silver Ave. SE Albuquerque NM 87108. URL: http://www.richmondproducts.com/files/8113/1550/0538/FR_15_Farnsworth_and_LanthonyD15_Instructions_Rev_1.7_0506.pdf (besucht am 11.03.2018).
- Richter, M. (2011). *Einführung in die Farbmeterik*. Sammlung Göschen. Berlin: De Gruyter.
- Rief, S., Jurecic, M., Kelter, J. und Stolze, D. (2015). *Die Rolle der Arbeitsumgebung in einer hyperflexiblen Arbeitswelt: Ergebnisse aus dem Verbundforschungsprojekt Office 21®; Kurzbericht zur Studie "Office Settings"*. Hrsg. von Wilhelm Bauer. URL: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-343382.html> (besucht am 20.10.2018).
- Rodriguez, C., Mayo, J. C., Sainz, R. M., Antolin, I., Herrera, F., Martin, V. und Reiter, R. J. (2004). „Regulation of antioxidant enzymes: A significant role for melatonin“. In: *Journal of Pineal Research* 36.1, S. 1–9.
- Roenneberg, T. (2004). „The decline in human seasonality“. In: *Journal of Biological Rhythms* 19.3, S. 193–195.
- Roenneberg, T., Daan, S. und Merrow, M. (2003a). „The art of entrainment“. In: *Journal of biological rhythms* 18.3, S. 183–194.
- Roenneberg, T. und Foster, R. G. (1997). „Twilight times: Light and the circadian system“. In: *Photochemistry and photobiology* 66.5, S. 549–561.
- Roenneberg, T., Kantermann, T., Juda, M., Vetter, C. und Allebrandt, K. V. (2013). „Light and the Human Circadian Clock“. In: *Circadian Clocks*. Hrsg. von A. Kramer und M. Merrow. Bd. 217. Handbook of Experimental Pharmacology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 311–331.
- Roenneberg, T., Wirz-Justice, A. und Merrow, M. (2003b). „Life between clocks: Daily temporal patterns of human chronotypes“. In: *Journal of biological rhythms* 18.1, S. 80–90.
- Roth, S. und Caldwell, W. (2005). „64.4: Four Primary Color Projection Display“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 36.1, S. 1818–1821.
- Rüger, M., Gordijn, M. C. M., Beersma, D. G. M., Vries, B. d. und Daan, S. (2006). „Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology: Comparison of daytime and nighttime exposure“. In: *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology* 290.5, R1413–20.
- Rüger, M., Gordijn, M. C. M., Beersma, D. G. M., Vries, B. de und Daan, S. (2005). „Nasal versus temporal illumination of the human retina: Effects on core body temperature, melatonin, and circadian phase“. In: *Journal of Biological Rhythms* 20.1, S. 60–70.
- Rushton, W. A. H. (1972). „Review Lecture. Pigments and signals in colour vision“. In: *The Journal of Physiology* 220.3, S. 1–31.

- Rushton, W. A., Powell, D. S. und White, K. D. (1973a). „Exchange thresholds in dichromats“. In: *Vision Research* 13.11, S. 1993–2002.
- (1973b). „Pigments in anomalous trichromats“. In: *Vision Research* 13.11, S. 2017–2031.
- (1973c). „The spectral sensitivity of "red" and "green" cones in the normal eye“. In: *Vision Research* 13.11, S. 2003–2015.
- Sahin, L., Wood, B. M., Plitnick, B. und Figueiro, M. G. (2014). „Daytime light exposure: Effects on biomarkers, measures of alertness, and performance“. In: *Behavioural Brain Research* 274, S. 176–185.
- Sakurai, M., Heckaman, R. L., Casella, S. E., Fairchild, M. D., Nakatsue, T. und Shimpuku, Y. (2008). „Effects of display properties on perceived color-gamut volume and preference“. In: *Journal of the Society for Information Display* 16.12, S. 1203.
- SAMSUNG (2015). *Eye Saver Mode*. URL:
<http://www.samsung.com/us/support/answer/ANS00043792/> (besucht am 20.10.2018).
- Sarkar, A. (2014). „CIE Special Metamerism Index: Change in Observer“. In: *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Hrsg. von R. Luo. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–9.
- Schanda, J. (2007). *Colorimetry: Understanding the CIE system*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- Scheer, F. A. J. L., van Montfrans, G. A., van Someren, E. J. W., Mairuhu, G. und Buijs, R. M. (2004). „Daily nighttime melatonin reduces blood pressure in male patients with essential hypertension“. In: *Hypertension* 43.2, S. 192–197.
- Schmauder, M. und Spanner-Ulmer, B. (2014). *Ergonomie: Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. 1. Aufl. REFA-Fachbuchreihe Arbeitsgestaltung. München: Hanser.
- Schmidt, T. M., Alam, N. M., Chen, S., Kofuji, P., Li, W., Prusky, G. T. und Hattar, S. (2014). „A role for melanopsin in alpha retinal ganglion cells and contrast detection“. In: *Neuron* 82.4, S. 781–788.
- Schwedische Akademie (2017). *Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 2017*. Hrsg. von Nobelprize.org. Nobel Media AB 2017. URL:
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2017/ (besucht am 20.10.2018).
- Semo, M., Gias, C., Ahmado, A., Sugano, E., Allen, A. E., Lawrence, J. M., Tomita, H., Coffey, P. J. und Vugler, A. A. (2010). „Dissecting a role for melanopsin in behavioural light aversion reveals a response independent of conventional photoreception“. In: *PLOS ONE* 5.11, e15009.

- Sharma, G., Wu, W. und Dalal, E. N. (2005). „The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations“. In: *Color Research & Application* 30.1, S. 21–30.
- Siebertz, K., Bebbler, D. v. und Hochkirchen, T. (2010). *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Sliney, D. H. (2002). „How light reaches the eye and its components“. In: *International journal of toxicology* 21.6, S. 501–509.
- (2005). „Exposure geometry and spectral environment determine photobiological effects on the human eye“. In: *Photochemistry and photobiology* 81.3, S. 483–489.
- Society for Information Display (2012). *Information Display Measurements Standard*. Hrsg. von Society for Information Display. URL: <http://icdm-sid.org/> (besucht am 20.10.2018).
- Souman, J. L., Borra, T., Goijer, I. d., Schlangen, L. J. M., Vlaskamp, B. N. S. und Lucassen, M. P. (2018). „Spectral Tuning of White Light Allows for Strong Reduction in Melatonin Suppression without Changing Illumination Level or Color Temperature“. In: *Journal of Biological Rhythms* 33.4, S. 420–431.
- Sroykham, W. und Wongsawat, Y. (2013). „Effects of LED-backlit computer screen and emotional selfregulation on human melatonin production“. In: *Conference proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference 2013*, S. 1704–1707.
- Stefani, O. (2018-01-10). „Die Wirksamkeit von Tageslichtreplikationen auf die Wissensarbeit“. Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden. URL: http://www.qucosa.de/recherche/frontdoor/cache.off?tx_slubopus4frontend%5Bid%5D=23097 (besucht am 20.10.2018).
- Stefani, O., Bues, M., Pross, A., Hille, K. und Spath, D. (2010a). „Lichtdynamik am Wissensarbeitsplatz der Zukunft“. In: *Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten*. Hrsg. von Martin Schütte. Dortmund: GfA-Press, S. 71–74.
- Stefani, O., Bues, M., Pross, A., Mebben, S., Westner, P., Dudel, H. und Rudolph, H. (2012). „Moving clouds on a virtual sky affect well-being and subjective tiredness positively“. In: *CIE 2012 "Lighting Quality and Energy Efficiency". Proceedings*. Vienna: CIE, S. 113–122.
- Stefani, O., Bues, M., Pross, A., Spath, D., Frey, S., Anders, D., Mager, R. und Cajochen, C. (2010b). „75.4: Evaluation of Human Reactions on Displays with LED Backlight and a Technical Concept of a Circadian Effective Display“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 41.1, S. 1120–1123.

- Stefani, O., Kroetz, S. und Pross, A. (2016). „Effects of discernible illumination changes on performance and condition“. In: *Proceedings of CIE 2016 "Lighting Quality and Energy Efficiency"*. Hrsg. von CIE. Bd. x042. Vienna: CIE, S. 540–546.
- Stefani, O., Pross, A., Schöllhorn, I., Ilg, L. und Plischke, H. (2017). „The Impact of Dynamic Lighting on Cognitive Processes“. In: *EUROPEAN Lighting Conference: Proceedings*. Hrsg. von Lighting engineering society of Slovenia, S. 177–181.
- Stevens, R. G. (2006). „Artificial lighting in the industrialized world: circadian disruption and breast cancer“. In: *Cancer causes & control : CCC* 17.4, S. 501–507.
- Stevens, S. S. (1957). „On the psychophysical law“. In: *Psychological review* 64.3, S. 153–181.
- Stiles, W. S. und Burch, J. M. (1958). „Interim Report to the Commission Internationale de l’Eclairage, Zurich, 1955, on the National Physical Laboratory’s Investigation of Colour-matching (1955)“. In: *Optica Acta: International Journal of Optics* 2.4, S. 168–181.
- (1959). „N.P.L. Colour-matching Investigation: Final Report (1958)“. In: *Optica Acta: International Journal of Optics* 6.1, S. 1–26.
- Stinchcombe, A. R., Mouland, J. W., Wong, K. Y., Lucas, R. J. und Forger, D. B. (2017). „Multiplexing Visual Signals in the Suprachiasmatic Nuclei“. In: *Cell reports* 21.6, S. 1418–1425.
- Stockman, A. und Brainard, D. H. (2015). „Fundamentals of color vision I: color processing in the eye“. In: *Handbook of color psychology*. Hrsg. von A. J. Elliot, M. D. Fairchild und A. Franklin. Cambridge handbooks in psychology. Cambridge: Cambridge University Press, S. 29–69.
- Stockman, A., MacLeod, D. I. und Johnson, N. E. (1993). „Spectral sensitivities of the human cones“. In: *Journal of the Optical Society of America A* 10.12, S. 2491–2521.
- Stockman, A. und Sharpe, L. T. (2000). „The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype“. In: *Vision Research* 40.13, S. 1711–1737.
- Stokes, M., Fairchild, M. D. und Berns, R. S. (1992). „Colorimetric quantified visual tolerances for pictorial images, Comparison of Color Images Presented in Different Media“. In: *ISCC/TAGA 1992 Williamsburg Conference on Comparison of Color Images Presented in Different Media*. Hrsg. von M. Pearson. John Wiley & Sons, S. 757–777.
- Sugiura, H. (2009). „Multiple Primary Color Backlights“. In: *LCD backlights*. Hrsg. von S. Kobayashi, S. Mikoshiba und S. Lim. Wiley-SID series in display technology. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, S. 33–47.

- Sugiura, H., Kaneko, H., Kagawa, S., Ozawa, M., Tanizoe, H., Katou, H., Kimura, T. und Ueno, H. (2005). „25.4: Six-Primary-Color 23- in WXGA LCD using Six-Color LEDs“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 36.1, S. 1124.
- Sugiura, H., Kaneko, H., Kagawa, S., Someya, J. und Tanizoe, H. (2006). „Wide Color Gamut Displays Using LED Backlight - Signal Processing Circuits -“. In: *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, S. 686–689.
- Svaetichin, G. (1956). „Spectral response curves from single cones“. In: *Acta physiologica Scandinavica. Supplementum* 39.134, S. 17–46.
- Takahashi, Y., Katsuura, T., Shimomura, Y. und Iwanaga, K. (2011). „Prediction Model of Light-induced Melatonin Suppression“. In: *Journal of Light & Visual Environment* 35.2, S. 123–135.
- Teragawa, M., Yoshida, A., Yoshiyama, K., Nakagawa, S., Tomizawa, K. und Yoshida, Y. (2012). „Multi-primary-color displays: The latest technologies and their benefits“. In: *Journal of the Society for Information Display* 20.1, S. 1.
- Thapan, K., Arendt, J. und Skene, D. J. (2001). „An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans“. In: *The Journal of Physiology* 535.1, S. 261–267.
- Tipler, P. A., Mosca, G. und Wagner, J. (2015). *Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tosini, G. und Iuvone, P. M. (2014). „Role of Melatonin and Dopamine in the Regulation of Retinal Circadian Rhythms“. In: *The retina and circadian rhythms*. Hrsg. von G. Tosini, P. M. Iuvone, D. G. McMahon und S. P. Collin. Springer series in vision research. New York: Springer, S. 49–68.
- Tosini, G., Iuvone, P. M., McMahon, D. G. und Collin, S. P., Hrsg. (2014). *The retina and circadian rhythms*. Springer series in vision research. New York: Springer.
- TÜV Rheinland (2015). *Low Blue Light Testing Standard for Monitors*. URL: https://www.tuv.com/en/middleeast/aboutus_me/news_me/news_detailpage_me_241198.html (besucht am 20.10.2018).
- Ueki, S., Nakamura, K., Yoshida, Y., Mori, T., Tomizawa, K., Narutaki, Y., Itoh, Y. und Okamoto, K. (2009). „62.1: Five-Primary-Color 60-Inch LCD with Novel Wide Color Gamut and Wide Viewing Angle“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 40.1, S. 927.
- Vaan, A. J. S. M. de (2007). „Competing display technologies for the best image performance“. In: *Journal of the Society for Information Display* 15.9, S. 657.

- Valois, R. L. de, Smith, C. J., Kitai, S. T. und Karoly, A. J. (1958). „Response of Single Cells in Monkey Lateral Geniculate Nucleus to Monochromatic Light“. In: *Science* 127.3292, S. 238–239.
- van der Lely, S., Frey, S., Garbazza, C., Wirz-Justice, A., Jenni, O. G., Steiner, R., Wolf, S., Cajochen, C., Bromundt, V. und Schmidt, C. (2015). „Blue blocker glasses as a countermeasure for alerting effects of evening light-emitting diode screen exposure in male teenagers“. In: *The Journal of adolescent health : official publication of the Society for Adolescent Medicine* 56.1, S. 113–119.
- Vandewalle, G., Gais, S., Schabus, M., Balteau, E., Carrier, J., Darsaud, A., Sterpenich, V., Albouy, G., Dijk, D. J. und Maquet, Pierre (2007). „Wavelength-dependent modulation of brain responses to a working memory task by daytime light exposure“. In: *Cerebral Cortex* 17.12, S. 2788–2795.
- Vandewalle, G. et al. (2013). „Blue light stimulates cognitive brain activity in visually blind individuals“. In: *Journal of cognitive neuroscience* 25.12, S. 2072–2085.
- ViewSonic (2015). *Blue Light Filter: Blaulichtfilter von ViewSonic*. URL: <http://www.viewsoniceurope.com/de/products/lcd/blue-light-filter/> (besucht am 13.04.2018).
- Viola, A. U., James, L. M., Schlangen, L. J. M. und Dijk, D.-J. (2008). „Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality“. In: *Scandinavian journal of work, environment & health* 34.4, S. 297–306.
- Wandell, B. A. (1995). *Foundations of vision*. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc.
- Wang, L. M., Suthana, N. A., Chaudhury, D., Weaver, D. R. und Colwell, C. S. (2005). „Melatonin inhibits hippocampal long-term potentiation“. In: *The European journal of neuroscience* 22.9, S. 2231–2237.
- West, R. S. et al. (2003). „43.4: High Brightness Direct LED Backlight for LCD-TV“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 34.1, S. 1262.
- Westland, S. (2016). „RGB Systems“. In: *Handbook of Visual Display Technology*. Hrsg. von J. Chen, W. Cranton und M. Fihn. Cham, Schweiz: Springer International Publishing, S. 171–177.
- Widdel, H. und Post, D. L., Hrsg. (1992). *Color in electronic displays*. New York: Springer-Verlag.
- Wirz-Justice, A. und Roenneberg, T. (2013). „Circadiane und saisonale Rhythmen“. In: *Herbst-/winterdepression und lichttherapie*. Hrsg. von S. Kasper und H.-J. Möller. Springer, S. 203–212.

- Witzel, C. und Gegenfurtner, K. R. (2014). „Memory Color“. In: *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Hrsg. von R. Luo. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–7.
- Witzel, C. und Hansen, T. (2015). „Memory effects on color perception“. In: *Handbook of color psychology*. Hrsg. von A. J. Elliot, M. D. Fairchild und A. Franklin. Cambridge handbooks in psychology. Cambridge: Cambridge University Press, S. 641–659.
- Wood, B., Rea, M. S., Plitnick, B. und Figueiro, M. G. (2013). „Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression“. In: *Applied Ergonomics* 44.2, S. 237–240.
- Wright, W. D. (1929). „A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours“. In: *Transactions of the Optical Society* 30.4, S. 141.
- (1930). „A re-determination of the mixture curves of the spectrum“. In: *Transactions of the Optical Society* 31.4, S. 201.
- Wyszecki, G. und Stiles, W. S. (2000). *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2nd ed. Wiley classics library. New York: John Wiley & Sons.
- Yamaguchi, M., Teraji, T., Ohsawa, K., Uchiyama, T., Motomura, H., Murakami, Y. und Ohya, N. (2001). „Color image reproduction based on multispectral and multiprimary imaging: experimental evaluation“. In: *Electronic Imaging 2002*. Hrsg. von R. Eschbach und G. G. Marcu. SPIE Proceedings. SPIE, S. 15–26.
- Yang, Y.-C. et al. (2005). „31.1: Development of Six Primary-Color LCD“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 36.1, S. 1210.
- Zeiler, M. und Hüttner, J. (2009). „LED Backlights“. In: *LCD backlights*. Hrsg. von S. Kobayashi, S. Mikoshiba und S. Lim. Wiley-SID series in display technology. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, S. 181–194.
- Zeitzer, J. M., Dijk, D.-J., Kronauer, R. E., Brown, E. N. und Czeisler, C. A. (2000). „Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: Melatonin phase resetting and suppression“. In: *The Journal of Physiology* 526.3, S. 695–702.
- Zhang, F., Zhong, H., Chen, C., Wu, X.-., Hu, X., Huang, H., Han, J., Zou, B. und Dong, Y. (2015). „Brightly Luminescent and Color-Tunable Colloidal CH₃NH₃PbX₃ (X = Br, I, Cl) Quantum Dots: Potential Alternatives for Display Technology“. In: *ACS nano* 9.4, S. 4533–4542.
- Ziemann, O., Poisel, H., Bloos, M., Kramer, G. (2008). „Super Bright Illumination for Displays (SBID) using LEDs and Waveguides“. In: *Proceedings of POF 2008, 17th Int. Conf. on Plastic Optical Fibers, 26.08. - 28.08.2008; Santa Clara*, S. 1–4.

In dieser »Schriftenreihe zu Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement« werden die Dissertationen, die im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement IAT der Universität Stuttgart und am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO entstanden sind, veröffentlicht.

Die beiden Institute verknüpfen universitäre Grundlagenforschung mit angewandter Auftragsforschung und setzen diese erfolgreich in zahlreichen Projekten praxisgerecht um.

Technologiemanagement umfasst dabei die integrierte Planung, Gestaltung, Optimierung, Bewertung und den Einsatz von technischen Produkten und Prozessen aus der Perspektive von Mensch, Organisation, Technik und Umwelt. Dabei werden neue anthropozentrische Konzepte für die Arbeitsorganisation und -gestaltung erforscht und erprobt. Die Arbeitswissenschaft mit ihrer Systematik der Analyse, Ordnung und Gestaltung der technischen, organisatorischen und sozialen Bedingungen von Arbeitsprozessen sowie ihren humanen und wirtschaftlichen Zielen ist dabei zentral in die Aufgabe des Technologiemanagements eingebunden.

ISBN 978-3-8396-1496-9



ISSN 2195-3414

Fraunhofer Verlag