

Dissertation

**Rezeptororientierte Charakterisierung breitbandiger
Spektren als Basis einer mesopischen Hellempfindung**

von Diplom-Ingenieur
Sören Schäfer

von der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr.-Ing. Sebastian Möller

Gutachter: Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Stephan Völker

Gutachter: Univ. Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 30. April 2012

Berlin 2012

D83

“Mesopic is hot”

Wout van Bommel
Lux Europa 2009

KURZZUSAMMENFASSUNG

Der mesopische Bereich bildet den Übergang zwischen dem Tag- und Nachtsehen ab. Während die Vorgänge des photopischen und skotopischen Adaptationszustandes recht gut bekannt sind, ergeben sich hinsichtlich der Rezeptorinteraktion im Bereich des Dämmerungssehens viele komplexe Forschungsansätze. Eine Eigenheit des mesopischen Sehens bildet die Interaktion der Rezeptoren über die Stäbchen und die Zapfen sowie deren nachfolgenden Signalverarbeitung. Daraus folgend ergeben sich kontinuierliche Veränderungen der Hellempfindung in Abhängigkeit der Reizdimensionierung. Da das Hellempfinden eine grundsätzliche Funktion unseres Sehapparates bildet, gilt es, dieses in einem Komplex von Einflussfaktoren, wie Leuchtdichteadaptationsniveau, spektrale Zusammensetzung und Stimulusgröße, zu ergründen. Diesbezüglich gilt es das Problem herauszuheben, dass es weder eine mesopische Messtechnik gibt, noch einheitliche Verfahrensweisen zur Bestimmung einer mesopischen Hellempfindung. Für die Empfindungsquantifizierung dienen Ansätze aus der Psychophysik und somit der Mensch als Regelsystem. Hinsichtlich der Durchführung empirischer Untersuchungen wurde ein innovatives Versuchskonzept aufgebaut, welches die reproduzierbare, freie Erzeugung verschiedenster Spektren zu kontrollierten Bedingungen ermöglicht. Weiterhin wurde ein Methodenvergleich zwischen dem Memory Brightness Matching (MBM) und dem Successive Binocular Brightness Matching (SBBM) durchgeführt, wobei die zweite Methode weitere Verwendung in einem Hauptversuch mit 24 Probanden fand. Um auf das Hellempfinden in Abhängigkeit der untersuchten Variablen rückschließen zu können, bildeten die eingestellten spektralen Abgleiche gleicher Hellempfindung die Grundlage für den Einsatz wahrnehmungspsychologisch angepasster spektraler Empfindlichkeitsfunktionen. Zur Modellierung der gewonnenen Ergebnisse wurde auf das Prinzip eines 4-Komponentenmodells zurückgegriffen, welches sich rezeptorbasiert darstellt. Unter Verwendung rezeptororientierter Empfindlichkeitsfunktionen für Zapfen und Stäbchen ist ein Ausgleich der den mesopischen Bereich kennzeichnenden Nichtlinearitäten und Interaktionen gegeben. Es ergibt sich ein Berechnungsmodell, mit welchem innerhalb der Systemgültigkeit rezeptorbasierte, äquivalente Leuchtdichteverhältnisse als Operationalisierungsmaß einer mesopischen Hellempfindung berechnet werden können. Auf Spezialfälle einer Dominanzausprägung, die das Hellempfinden beeinflusst, ist vertiefend eingegangen. Folglich lässt sich auf relative Hellempfindungen in den Anwendungsbereichen des mesopischen Sehens, wie beispielsweise der Straßenbeleuchtung, Automobilbeleuchtung und ambienten Beleuchtung, schließen. Potentiale hinsichtlich einer erhöhten Energieeffizienz und Wahrnehmungsleistung sollten in weiterführenden Arbeiten unbedingt erschlossen werden.

Schlagwörter: *mesopisch, Hellempfinden, programmierbare Lichtquelle, äquivalente Leuchtdichte, Rezeptor, Hellempfindlichkeitsfunktion, visuelle Dominanz, Energieeffizienz*

ABSTRACT

The mesopic range is the progressive transition between the vision at day (photopic) and at night (scotopic). While underlying visual processes during photopic as well as scotopic adaptation levels are well known, the mesopic vision between those two rises many complex research questions because of the occurring receptor interaction during twilight. Mesopic vision is characterized by non-linearities and interaction processes of two receptor types – cones and rods – as well as their following signal processing. That implies a continuous change in brightness perception with regard to the stimulus nature. Therefore it is necessary to investigate the influence of the mesopic brightness perception considering several aspects simultaneously - the luminance adaptation level, the spectral power distribution and of course the stimulated retinal area. One not satisfyingly solved problem is the measurability of mesopic values, especially the brightness perception. No generalized approach is known. The human has to serve as a feedback control system in data collection with a psychophysical approach. For empirical studies a designed and innovative experimental setup is built on which enables the free and reproducible generation of any light spectra under controlled conditions. Furthermore two evaluation methods - the Memory Brightness Matching and the Successive Binocular Brightness Matching – were compared. For the main test, realised with 24 participants, the latter method was chosen. The evaluated data sets of matched spectral power distributions are the basis for a later consideration with perception based luminous efficiency functions. To model the gained results a receptor based 4-components model was formed. Here every component is symbolized by a cone or a rod quota. By using receptor oriented luminous efficiency functions for rods and cones it is possible to smooth the non-linearities and interactions that characterise mesopic vision. As a result, a calculation model is originated based on the receptors of the eye. Now there is the possibility to specify an equivalent luminance ratio as a value of mesopic brightness perception within the valid system. In addition, special cases of visual dominance occurred in mind which have an influence on the mesopic brightness perception. Accordingly, it is possible to determine the mesopic brightness perception for applications like street lighting, automotive lighting and ambient lighting, which come to use under or produce mesopic lighting conditions. Potentials in terms of a higher energy efficiency and perception performance will be topics for future research.

key words: *mesopic, brightness perception, agile and programable light source, equivalent luminance, rod-cone-interaction, luminous efficiency functions, visual dominance, energy efficiency*

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, welche mir in jeder Phase dieser Dissertation helfend, motivierend und kritisierend zur Seite standen.

Besonderer Dank gilt:

- meinen Betreuern Prof. Dr. Stephan Völker und Prof. Dr. Cornelius Neumann, welche immer als Mentoren für mich zur Verfügung standen. Insbesondere gilt meine Anerkennung Herrn Prof. Dr. Neumann, der mit seinem Engagement diese Promotion erst ermöglichte.
- den von mir betreuten Studenten, die mir mit Fleiß, Innovationsgeist und immerwährender Diskussionsbereitschaft den Rücken stärkten.
- allen Mitarbeitern des L-LAB's, welche mir in vielen Situationen nicht nur helfend, sondern auch mit aufbauenden Worten und Taten zur Seite standen. Hierbei möchte ich mich besonders bei meiner „Büroehfrau“ Susanne Köhler bedanken, welche durch Ihre kritisierende und oft pedantische Art zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen hat.
- Herrn Dr. Jürgen Locher, welcher immer die positiven Aspekte herauszuheben wusste und mich bei der Versuchsplanung und statistischen Auswertung dieser Arbeit mit Rat und Tat unterstützte.
- allen Probanden und Probandinnen, welche an meinen Versuchen teilgenommen haben. Ich bitte alle Probandinnen um Verzeihung, dass jene nicht explizit als weiblich gekennzeichnet sind, sondern sich in der Gruppe der Probanden wiederfinden.
- Herrn Ingo Fischbach und dem Team von OPTRONIC LABORATORIES für die Hilfe und die Ratschläge bei der „Domestizierung“ des OL 490.
- den Korrektoren dieser Arbeit Lisa Möckel und Dominic Reder.
- P. Rhodan, welcher mir in schwierigen Phasen half, verwirrenden Denkvorgängen zu entkommen und neue Energie zu sammeln,
- der Dr. Arnold-Hueck-Stiftung und der damit verbundenen Finanzierung meiner Promotionsarbeit.

Danke möchte ich auch meinen Eltern sagen, welche immer hinter mir standen und stehen werden.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZZUSAMMENFASSUNG	III
ABSTRACT (EN)	IV
DANKSAGUNG	V
INHALTSVERZEICHNIS	VII
KAPITEL 1	
<u>EINLEITUNG</u>	<u>11</u>
1.1 EINGRENZUNG DES FORSCHUNGSGEGENSTANDES	15
1.2 STRUKTUR DER ARBEIT	17
KAPITEL 2	
<u>GRUNDLAGEN ZUR PHYSIOLOGIE DES VISUELLEN APPARATES</u>	<u>19</u>
2.1 RETINALE STRUKTUR	20
2.2 PRINZIPIEN DES SEHVORGANGS	25
2.3 GERONTOLOGISCHE MERKMALSVERÄNDERUNGEN	33
2.4 ASSOZIIERTE WAHRNEHMUNGSPSYCHOLOGISCHE EFFEKTE ZUR HELLEMPFINDUNG	38
2.5 BESCHREIBUNG DER HELLEMPFINDUNG	40
KAPITEL 3	
<u>PHOTOMETRISCHE BASIS UND BESCHREIBUNG DER HELLEMPFINDUNG</u>	<u>43</u>
3.1 GRENZBEREICHE DER SPEKTRALEN EMPFINDLICHKEIT	44
3.2 BEREICH DES MESOPISCHEN SEHENS	50
3.3 PHOTOMETRISCHE BEWERTUNG MITTELS SI-BASISEINHEIT	54
3.4 PSYCHOPHYSIKALISCHE BESCHREIBUNG DER HELLEMPFINDUNG ALS PRINZIP DER ÄQUIVALENTEN LEUCHTDICHTE	56
3.5 UNTERSUCHUNGSMETHODEN ZUM ABGLEICH DER HELLEMPFINDUNG	58
KAPITEL 4	
<u>DETERMINATION VON FORSCHUNGSVARIABLEN</u>	<u>63</u>
4.1 BISHERIGE FORSCHUNGSARBEITEN ZUR HELLEMPFINDUNG	64
4.1.1 ALLGEMEINE ARBEITEN ZUR SPEKTRALEN HELLEMPFINDUNG	64
4.1.2 HELLIGKEITSBASIERTE UND ERGÄNZENDE MODELLE DER „MESOPISCHEN“ PHOTOMETRIE	70
4.1.3 WEITERFÜHRENDE FORSCHUNGEN ZUM VERGLEICH DER HELLEMPFINDUNGEN	76
4.2 KONKRETISIERUNG FORSCHUNGSRELEVANTER ASPEKTE ZUR EVALUATION DER HELLEMPFINDUNG	80
4.2.1 FORSCHUNGSMETHODEN	80
4.2.2 SPEKTRALE EMPFINDLICHKEITSFUNKTIONEN	84
4.2.3 SPEKTRALE VERTEILUNGEN DER STIMULI	86
4.2.4 ALLGEMEINE DETERMINATIONEN	87

KAPITEL 5	
<u>EXPERIMENTELLER AUFBAU</u>	89
5.1 LICHTQUELLE	90
5.2 PROJEKTIONSAUFBAU	92
5.3 RESULTIERENDE ANFORDERUNGEN	96
5.4 ANSTEUERUNG	98
KAPITEL 6	
<u>REALISIERUNG DER STIMULI</u>	101
6.1 LINEARISIERUNG UND KALIBRIERUNG	102
6.2 EINSTELLUNG DER STIMULILEUCHTDICHTEN UND AUTOMATISIERUNGS- PROZESSE	105
6.3 ERZEUGTE STIMULI UND DEREN EIGENSCHAFTEN	107
KAPITEL 7	
<u>BETRACHTUNG SYSTEMATISCHER EINFLUSSFAKTOREN</u>	111
KAPITEL 8	
<u>UNTERSUCHUNG ZUR HELLEMPFINDUNG UND METHODENPRÄFERENZ</u>	115
8.1 FORSCHUNGSANSATZ UND –HYPOTHESEN	116
8.2 PROBANDENKOLLEKTIV	118
8.3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	119
8.4 METHODENVERGLEICHSBEZOGENE ERGEBNISSE	122
KAPITEL 9	
<u>UNTERSUCHUNGEN ZUM VERGLEICH DER HELLEMPFINDUNG MITTELS WAHRNEHMUNGSANGEPASSTER BEWERTUNGSSYSTEME</u>	127
9.1 FORSCHUNGSANSATZ UND –HYPOTHESEN	128
9.2 PROBANDENKOLLEKTIV UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	130
9.3 ERGEBNISSE DER INFERENZSTATISTIK UND DESKRIPTIVEN STATISTIK	130
9.4 UNTERSUCHUNGSGÜTE	138
9.5 ERGEBNISDISKUSSION	141
KAPITEL 10	
<u>MODELLENTWICKLUNG ZUR BESCHREIBUNG DER MESOPISCHEN HELLEMPFINDUNG</u>	147
10.1 PRÄMISSEN DER MODELHAFTE BESCHREIBUNG	148
10.2 MODELLENTWICKLUNG	149
10.3 MODELVALIDIERUNG NACH CIE 141 UND KENNWERTBERECHNUNG	153
10.4 DISKUSSION DER ERGEBNISSE	154

KAPITEL 11	
DOMINANZVERHALTEN VISUELLER KANÄLE	157
11.1 THEORETISCHER HINTERGRUND UND DARSTELLUNG DER PROBLEMATIK	158
11.2 DOMINANZCLUSTER	161
11.3 AUSWIRKUNGEN DER DOMINANZ AUF DAS HELLEMPFINDEN	162
11.3 NEUBESTIMMUNG DES MODELLANSATZES UNTER AUSPRÄGUNG DER DOMINANZ	165
11.5 ERGEBNISSE UND EMPFEHLUNGEN FÜR AUFBAUENDE FORSCHUNGSARBEITEN	166
KAPITEL 12	
ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	169
12.1 ZUSAMMENFASSUNG	170
12.2 ERGEBNISSE	172
12.3 ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGSASPEKTE	174
LITERATURVERZEICHNIS	177
SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	191
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	195
TABELLENVERZEICHNIS	199
VERZEICHNIS DES ANHANGS	201
BETREUTE WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN	219
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	220

KAPITEL 1

EINLEITUNG

„Das Universum weist eine dramatische Entstehungsgeschichte auf. Da die kosmische Hintergrundstrahlung die früheste direkt beobachtbare Signatur der Geburt des Universums darstellt, bildet sie zugleich eine der wesentlichen Stützen unseres kosmologischen Weltbilds. Sie gilt als Beleg, dass vor etwa 13,7 Milliarden Jahren mit dem Big Bang – dem Urknall – Materie, Raum und Zeit gemeinsam entstanden und sich seitdem in einem expandierenden Universum fortentwickeln. Vor 13,7 Milliarden Jahren war das Universum extrem heiß, klein und undurchsichtig. Es bestand aus einer ionisierten Gaswolke. Mit immer größer werdendem Raum kühlte sich das einstige Billionen Grad heiße Plasma ab. Als die Temperatur auf unter 10000 Grad fiel, verbanden sich die Elektronen und Protonen zu Wasserstoffatomen. Auch die ersten *Photonen* konnten sich ungestört ausbreiten. Das Universum, mittlerweile 300000 Jahre alt, begann damit durchsichtig zu werden.“ [ESA 2009]

Die Frage nach dem Licht selbst ist somit durch die Physik geklärt. Schwieriger steht es um die Frage nach der „Sichtbarkeit“ des Lichts. Oft findet man in der Literatur die Angabe, dass 90% der Informationen des Menschen über den visuellen Kanal - das Auge - wahrgenommen werden. Inwiefern diese Angabe als gerechtfertigt einzustufen ist, gilt es zu hinterfragen. Dass jedoch unser visuelles System eines der wichtigsten Wahrnehmungs- und Verarbeitungssysteme darstellt, kann mannigfaltig im Alltag erfahren werden. Damit das Auge die Aufgabe der Informationsaufnahme in allen Situationen optimal erfüllen kann, arbeitet es dynamisch und mittels zweier Arten von photonensensitiven Rezeptoren. Vor allem durch die am Sehen beteiligten Rezeptoren und stattfindenden dynamischen Adaptationsprozesse kann ein Intensitätsbereich von über elf Dekaden abgedeckt werden. Generell lässt sich der Bereich des menschlichen Sehens in das photopische (Tagsehen), mesopsiche¹ (Dämmerungssehen) und skotopische Sehen (Nachtsehen) unterteilen. Während der photopische Zustand durch die Rezeptorcharakteristika der Zapfen definiert wird und das skotopische Sehen durch die Eigenschaften der Stäbchen, ist der mesopische Bereich der visuellen Wahrnehmung durch eine nichtlineare Interaktion beider Rezeptoren und deren Eigenheiten geprägt. Im Gegensatz zu den fundierten wissenschaftlichen

¹ Im Sprachgebrauch auch als Twilight Zone, Mesopia, Mesopic Vision, Meso etc. zu finden.

Erkenntnissen, über das photopische und skotopische Sehen stellt der Bereich des Dämmerungssehens und dessen Beschreibung eine enorme Herausforderung dar. Nicht nur die Erfassung der Komplexität jener Interaktion der Stäbchen und Zapfen, sondern vielmehr die Eigenart, dass sich diese kontinuierlich je nach Adaptationsniveau im Bereich von vier Intensitätsdekaden verändert, ist als nicht trivialer Effekt anzusehen. Es ist bisher weder gelungen mesopische Leuchtdichten als solche zu messen, noch die Grenzen des mesopischen Bereichs klar zu setzen.

Derzeit basiert die Beschreibung visueller Eindrücke auf der Grundlage einer photopischen Empfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$, welche 1924 von der CIE (Internationale Beleuchtungskommission) empfohlen wurde. Es findet eine Transformation von radiometrischen in photometrische Größen statt, wobei Strahlung mit der spektralen Empfindlichkeitsfunktion des Auges gewichtet wird [CIE 1926]. Gekennzeichnet ist die photopische spektrale Empfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ durch ein Maximum bei $\lambda=555$ nm. Für die Beschreibung des stäbchengeprägten skotopischen Bereichs existiert seit 1951 eine spektrale Empfindlichkeitsfunktion $V'(\lambda)$, welche die photometrische Bewertung des Nachtsehens ermöglicht [CIE 1951]. Anders als der photopische Normalbeobachter (2° Sehwinkel) ist der skotopische Normalbeobachter durch eine maximale spektrale Empfindlichkeit bei $\lambda=507$ nm geprägt. Zusätzlich zu den genannten existiert eine Vielzahl an ergänzenden Empfindlichkeitsfunktionen, welche vor allem den photopischen Bereich des Sehens außerhalb der Restriktionen von $V(\lambda)$ zu kennzeichnen versuchen [vgl. HARTGE 1991].

Ausgehend von $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ sind der photopische und skotopische Bereich hinreichend beschrieben. Dem folgend findet mit Abnahme der Helligkeit eine Zunahme der spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges hin zu kürzeren Wellenlängen statt. Anders formuliert: mit abnehmendem Leuchtdichteadaptationsniveau erscheinen uns bläuliche Lichter gleicher Leuchtdichte heller als unter photopischen Bedingungen. Dieser Effekt wurde zum ersten Mal von JAN EVANGELISTA PURKINJE im Jahre 1825 beobachtet und wird seitdem als PURKINJE-Effekt bezeichnet [vgl. PURKINJE 1825]. Der PURKINJE-Effekt ist somit kennzeichnend für den mesopischen Bereich. Mit der Veränderung der spektralen Empfindlichkeit findet unter anderem eine Veränderung der Hellempfindung statt. Parallel dazu sind Parameter wie Kontrast, Sehschärfe und Reaktionszeit, welche die Erfüllung einer Sehaufgabe maßgeblich beeinflussen, einer Variation unterworfen.

Zur Bewältigung der alltäglichen visuellen Herausforderungen nimmt die Hellempfindung eine Kernstellung ein, da diese nicht zuletzt in allen drei Bereichen der visuellen Wahrnehmung des Menschen präsent ist. Während im Photopischen eine Identifikation zusätzlich über chromatische Anteile möglich ist, bleibt dies im Skotopischen verwehrt. Die Unterscheidung von Objekten anhand der Struktur, Form und Bewegung ist ohne eine Helligkeitsinformation nicht möglich. Je weiter die Sehleistung mit sinkendem Leuchtdichteadaptationsniveau abnimmt, desto schwerer fällt es, Objektdetails zu erkennen. Für Anwendungsbereiche innerhalb des mesopischen Sehens kann es somit nützlicher sein, im Vorfeld Helligkeitsinformation betreffender Objekte zu separieren und deren Einfluss auf die Objektdetektion zu erforschen. Neben anderen Anforderungen an ein künftiges photometrisches System ist es die Hellempfindung, welche eine wichtige Rolle im mesopischen Bereich einnimmt [vgl. SAGAWA 2005]. Es bleibt zu konstatieren, dass die Information über einen Helligkeitsunterschied einer Sehaufgabe neben der chromatischen Information die bedeutsamste ist.

Idealerweise sollte die Leuchtdichte² als Indikator für die empfundene Helligkeit dienen, da mehrere Stimuli unterschiedlicher Spektren, aber gleicher Leuchtdichte, in einer gleichen Hellerscheinung, Hellempfindung resultieren. Diese Annahme ist jedoch schon für die Kriterien, unter welchen die $V(\lambda)$ -Funktion Gültigkeit besitzt, verletzt (z.B. 2° Stimulusgröße, photopische Stimuli) [vgl. BODMANN 1992]. Hinzu kommen durch eine photopische Bewertung der Leuchtdichte hinsichtlich einer Hellempfindung nicht betrachtete wahrnehmungspsychologische Effekte wie der HELMHOLTZ-KOHLRAUSCH-Effekt. Ursache für die Diskrepanz des Prädiktors Leuchtdichte für eine Quantifizierung der Helligkeit im Mesopischen ist die Beteiligung der Stäbchen neben den Zapfen am Sehprozess sowie ein eventueller chromatischer Einfluss [vgl. SAGAWA 2005].

Kenntnis und Beschreibungsfähigkeit der Prozesse des mesopischen Sehens sind von wissenschaftlicher Relevanz und gerade hinsichtlich diverser Anwendungsgebiete von Bedeutung.³ In Betrachtung des technologischen Fortschritts der Lichtquellenentwicklung, stehen dem Anwender derzeit eine Fülle an Möglichkeiten zur Verfügung. In der automobilen Lichttechnik sind dies derzeit Halogenglühlampen, Xenon-Lampen (HID) sowie Leuchtdioden (LED). Im Fall der ortsfesten Straßenbeleuchtung werden die Technologien beispielsweise durch Leuchtstofflampen, Metaldampflampen und LED erweitert. Weitere, den Blick auf den Komplex der mesopischen Wahrnehmung verschärfende, Anwendungsgebiete stellen die Notbeleuchtung sowie die Display- und Anzeigenbeleuchtung dar. Gleichgültig, welches dieser Beispiele für eine mesopisch-orientierte Bewertung der Helligkeit herangezogen wird, Aspekte der Sicherheit, des Sicherheitsgefühls und der Wahrnehmung sind stets vertreten. Der primäre Unterschied in den genannten Beispielen ist die spektrale Verteilung. Diese ist auch für die unterschiedliche Hellempfindung von beispielweise Halogen- und LED-Systemen im Automobilbereich verantwortlich. Vorausgesetzt, dass beide Systeme die gleiche Leuchtdichte im Fahrzeugvorfeld erzeugen, wird der Betrachter gemäß dem PURKINJE-Effekt das LED-System mit höherem kurzwelligem Anteil heller bewerten als das Halogen-System. Aus der Weiterführung dieses Gedankens lässt sich die Forderung nach der korrekten Beschreibung einer Hellempfindung im mesopischen Bereich auch auf Applikationen und deren Qualitätsmerkmale ausweiten. Gerade für Produkte, welche auf Lichtquellen unterschiedlicher spektraler Verteilungen beruhen, sind die Aspekte Sichtbarkeit, Homogenität und Auffälligkeit interessant [vgl. SCHÄFER 2010B].

Strategisch betrachtet birgt das Vorhandensein des PURKINJE-Effekts weiteres Potential. Durch den Einsatz neuer Lichtquellen in den Bereichen Straßenbeleuchtung, Automobilbeleuchtung und ambiente Beleuchtung, wie beispielsweise LED, soll eine erhöhte Energieeffizienz erreicht werden. Die spektrale Verteilung einer „weißen“, phosphorkonvertierten LED beispielsweise hat einen erhöhten Anteil im „blauen“ Spektrum. Es wird somit die spektrale Empfindlichkeit im mesopischen Bereich unterstützt, wodurch ein erhöhter Helligkeitseindruck gegenüber konventionellen Lichtquellen (z. B. Halogen) bei gleicher Leuchtdichte erzeugt wird. Daraus resultierend besteht die Möglichkeit, die in die Lichtquelle eingekoppelte, elektrische Energie um die relative Größe der Leuchtdichtedifferenz bei gleicher Hellempfindung beider Spektren abzusenden - in oben genanntem Fall auf das Helligkeitsniveau von Halogen. Verallgemeinernd formuliert: Stellt das Hellempfinden das Kernkriterium⁴ zur Auslegung lichttechnischer Systeme gleich welcher Art dar, ist eine Steigerung der Energieeffizienz erreichbar.

² Im Folgenden kennzeichnet der allein stehende Begriff Leuchtdichte die $V(\lambda)$ basierte Größe.

³ Eine Übersicht von Leuchtdichten relevanter Einsatzbereiche ist dem Anhang (S. 201 f) zu entnehmen.

⁴ Die Kontrastwahrnehmung wird in diesem Fall vorerst nicht betrachtet.

Dies ist der Fall, wenn bei gleicher Adaptationsleuchtdichte im mesopischen Bereich der Beitrag der elektrischen Leistung für die Lichtquelle um jenen relativen Anteil herabgesetzt wird, der eine gleiche Hellempfindung mit der zu vergleichenden spektralen Verteilungen hervorruft. Unter konstanten Bedingungen, jedoch mit Ausnahme der spektralen Verteilung, ergibt sich daraus eine auf der zu beleuchtenden Fläche geringere gemessene photopische Leuchtdichte für kurzwellig dominantere Spektren in Bezug auf langwellig dominante spektrale Verteilungen bei angestrebter, gleich empfundener Helligkeit.

Es empfiehlt sich vor dem gerade beschriebenen Hintergrund somit nicht nur eine Verwendung von energieeffizienten Systemen an sich, sondern auch von Lichtquellen, welche eine breitbandige spektrale Verteilung mit erhöhtem kurzwelligem Anteil besitzen. In diesem Sinn ist eine weitere Effizienzsteigerung mit Hinblick auf den Energieaspekt allein durch das Wissen um die wahrnehmungspsychologischen Effekte im mesopischen Bereich realisierbar.

Der technische Aufwand für die Implementierung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit marginal. Im Hinblick auf den vermehrten Wunsch nach einer tageslichtähnlichen Lichtfarbe in der Vorfeldbeleuchtung von Fahrzeugen [vgl. SCHMIDT 2006; KÖHLER 2008]⁵ kommt den untersuchten breitbandigen spektralen Verteilungen sogar eine Präferenz aus Kundensicht entgegen. Mit diesem Bezug zeichnet sich erneut eine Bevorzugung des Attributs Energieeffizienz ab. Bereits im Jahr 2020 prognostiziert die Firma VALEO dem Trend Energieeffizienz den ersten Platz als Motivation zur Kaufentscheidung eines Automobils [vgl. GRIMM 2010].

Wie sehr die Präferenz zu breitbandigem, „weißem“ Licht geht, verdeutlicht der British Standard BS 5489-1:2003 für Außenbeleuchtung, insbesondere für Nebenstraßen. Dieser besagt, dass beim Erreichen eines CRI (Colour Rendering Index) von mehr als 60 eine Reduzierung des Beleuchtungslevels um eine Klasse der S-Serie erfolgen kann. Inwiefern ein photopisches Maß wie der CRI jedoch für etwas anderes als die Beschreibung der Farbwiedergabe genutzt werden kann und soll, bleibt nachzuweisen. Eine kritische Betrachtung und aktuelle Forschungen werden derzeit an der Universität von Sheffield durchgeführt [vgl. FOTIOS 2010].

Das Ziel für eine Beschreibung der mesopischen Hellempfindung und deren Nutzbarmachung in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen muss die adäquate Überführung in operationalisierte Maße sein. Da eine photometrische Messung im Mesopischen nur schwer möglich ist, hat eine Übertragung des subjektiven Eindrucks der Helligkeit im mesopischen Umfeld über photopisch und ggf. skotopisch bestimmte Maßzahlen zu erfolgen. Eine einseitige, lediglich zapfenbasierte Bewertung ist abzulehnen, da das Lumen zwar die visuell gewichtete Größe der elektromagnetischen Strahlung darstellt, jedoch nur auf der visuellen Antwort des Zapfenmechanismus beruht. Vice versa verhält es sich mit dem „skotopischen Lumen“. Unter mesopischen Bedingungen ist die lichttechnische Größe des Lichtstroms, zweifellos unangemessen [vgl. LEWIS 1999].

⁵ SCHMIDT führte eine Gruppendiskussion zum Einfluss der Lichtfarbe auf die Blendung und Erkennbarkeitsentfernung von LED-Frontscheinwerfern durch. Die Attribute „Farbe“ und „Helligkeit“ wurden hinsichtlich der Gesamtaussagen auf Platz 1 und 3 (insgesamt sechs Attribute) gesetzt.

KÖHLER beschäftigte sich mit der Attributseinschätzung von Probanden hinsichtlich des Kriteriums „Helligkeit“ bei fahrzeugeigenen Scheinwerfern. Verschiedene Scheinwerfersysteme wurden bezüglich der Wichtigkeit der Attribute „Ausleuchtungsweite“, „Homogenität“, „Lichtfarbe“, „Helligkeit im Vorfeld“, „Tageslichtähnlichkeit“ und „hellste Stelle“ bewertet. Betrachtet man die Attribute „Lichtfarbe“ und „Tageslichtähnlichkeit“ zusammengefasst, verändert sich die genannte Reihenfolge der Wichtigkeit und das zusammengefasste Attribut belegt Platz 2.

Mit der Veränderung der spektralen Verteilung von Lichtquellen im Einsatz ist es zwingend notwendig, ein objektives Bestimmungssystem für die Hellempfindung und die Sehleistung zu erforschen und zu etablieren. Die zugrunde liegenden Eigenschaften des visuellen Systems und die darauf einwirkenden Umgebungsvariablen sind zu beachten und ggf. einzugrenzen. Seit PALMER 1966 mit der Arbeit an einem photometrischen System für mesopische Adaptationsniveaus begann, ist es bisher trotz intensiver internationaler Forschungsarbeit nicht gelungen, ein allgemeingültiges System der mesopischen Photometrie zu entwickeln.

Dem Grad der Komplexität Rechnung tragend, welcher dem mesopischen Sehen zugrunde liegt, sowie den photometrischen Restriktionen folgend, soll diese Forschungsarbeit dem Fokus entsprechen, ein objektives photometrisches System zur Bestimmung und Operationalisierung der Hellempfindung im Bereich des mesopischen Sehens zu realisieren. Durch die Festlegung von Gültigkeitsgrenzen wird die Systemgenauigkeit erhöht und das Gesamtsystem praktikabel.

1.1 Eingrenzung des Forschungsgegenstandes

Im mesopischen Bereich steht die Wissenschaft aufgrund der komplexen Struktur des Sehvorgangs immer noch am Anfang. Speziell für die Hellempfindung ist noch kein photometrisches System durch die CIE empfohlen. Die Helligkeit stellt eine empfindungsgemäße Größe dar, welche sich durch keine der existierenden Messtechniken absolut erfassen lässt. Gerade im mesopischen Bereich stellt die Leuchtdichte eine nur mäßige Beschreibungsgröße der Helligkeit dar. Ein wesentlicher Grund dafür lässt sich im Beitrag des chromatischen Kanals zur Hellempfindung finden. Dies wird als „brightness-luminance discrepancy“ bezeichnet [vgl. SAGAWA 2006]. Weiterhin ist bei einer allein photopischen Bewertung über die Leuchtdichte der Stäbchenmechanismus unberücksichtigt [vgl. BODROGI et al. 2009].

Für den Aufbau eines photometrischen Systems, welches im Bereich der Mesopie Gültigkeit besitzt, ist somit die psychophysikalische Forschung unumgänglich. Die vorliegende Arbeit wird diesem Grundsatz Rechnung tragen und mittels des Regelungssystems Mensch die Daten zur Generierung eines Bewertungssystems eruieren.

Generell ergeben sich folgende globale Fragestellungen für den Kontext dieser Dissertation:

- Welche visuellen Prozesse haben Einfluss auf die Bewertung der Hellempfindung?
- Welche Parameter beeinflussen die Bewertung der Helligkeit im mesopischen Bereich?
- Welche messtechnisch erfassbaren Größen sind für eine Quantifizierung und spätere Modellerzeugung innerhalb des mesopischen Bereichs heranzuziehen und wo liegen deren Grenzen?
- Wo liegen die Potentiale bereits bestehender Wahrnehmungsmodelle und wie exakt sind diese in der Bestimmung einer mesopischen Leuchtdichte bei gleicher Hellempfindung?
- Gibt es Unterschiede in der Untersuchungsmethodik und welche Auswirkungen hat dies auf die zu erhebenden Variablen? Wodurch sind einzelne Forschungsmethoden charakterisiert?
- Wo sind die Grenzen eines zu modellierenden Systems der mesopischen Hellempfindung und durch welche fundierten Prozesse des visuellen Apparates ist eine Modellierung sinnvoll durchführbar?

Für die Eingrenzung des Forschungsgegenstandes ergeben sich folgende Aspekte:

- Im Schwerpunkt dieser Arbeit und der vorliegenden Literaturlauswertung wird die mesopische Wahrnehmung betrachtet.
- Die Untersuchung beschränkt sich auf den Forschungsgegenstand der Hellempfindung, nicht auf sehleistungsbasierte Fragestellungen.
- Der in den Probandenversuchen untersuchte Leuchtdichtebereich beschränkt sich auf den oberen Teil der mesopischen Wahrnehmung und bildet damit im Kernpunkt Leuchtdichteverhältnisse ab, wie sie typischerweise in der automobilen Lichttechnik und ortsfesten Straßenbeleuchtung vorkommen. Gleiches gilt für die weiteren Untersuchungsvariablen wie spektrale Verteilung und stimulierte Netzhautgröße. Im Sinne der Querschnittsforschung und späteren Modellierung sind diese um theoretische Variablenausprägungen erweitert.
- Es werden nur breitbandige spektrale Verteilungen untersucht.
- Als Referenz dient ein simuliertes Halogenspektrum.
- Die betrachtete Probandengruppe besteht aus einer normalsichtigen Stichprobe.
- Es findet lediglich eine Betrachtung homogener Leuchtdichteverteilungen statt.
- Alle Probandenversuche werden unter Laborbedingungen durchgeführt.
- Die Ergebnisse des Hauptversuchs beruhen auf einer Methode des Successive Binocular Brightness Matching (SBBM).
- Im Sinne der späteren praktischen Anwendung ist für die erfolgte Modellierung und Systemerzeugung das Kriterium der praktischen Realisierbarkeit zu beachten.

Im Zuge der in den Kapiteln 2, 3 und 4 dargelegten Komplexität der zu untersuchenden Thematik sowie dem Fehlen einer mesopischen Messtechnik unterliegt die gesamte Empirie dem in Abbildung 1 visualisiertem Workflow. Den Ausgangspunkt bildet eine Abkehr von der traditionellen spektralen Empfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$, welche defizitbehaftet ist (Kapitel 3.1). Demnach muss diese jedoch zur Eingrenzung des Untersuchungsbereichs im Mesopischen als Mess- und Vergleichsgröße zu anderen Forschungsarbeiten dienen. In einem zweiten Schritt beurteilt der Mensch dargebotene spektrale Verteilungen. Es erfolgt eine messtechnische Zuwendung zur Radiometrie. Anschließend werden alternative Beschreibungen der spektralen Empfindlichkeit ($V_{\text{phy}}(\lambda)$) genutzt, um die radiometrischen Abgleiche in photometrische Größen zu transformieren. Ziel ist es, die Defizite der von $V(\lambda)$ bewerteten spektralen Verteilungen hinsichtlich der Hellempfindung und der „Leuchtdichte“ zu umgehen und mit wahrnehmungsorientierten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen verschiedener Autoren, Methoden und Untersuchungsvariablen, beispielsweise der stimulierten Netzhautgröße, zu beschreiben. Eine vom Menschen wahrgenommene mesopische Hellempfindung soll somit besser nachvollzogen werden können.

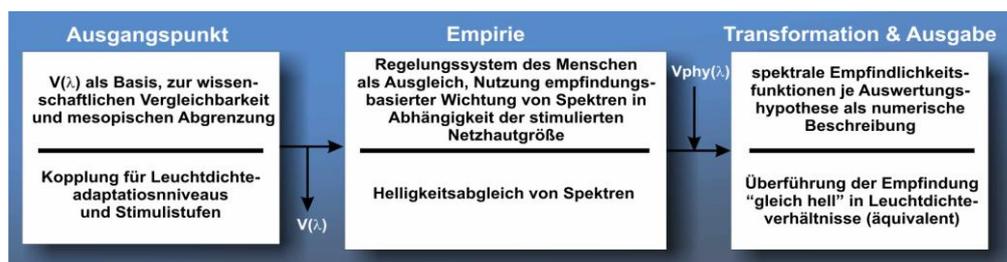


Abbildung 1: Workflow der Empirie zur Beschreibung einer wahrnehmungsorientierten Hellempfindung im mesopischen Bereich [vgl. SCHÄFER 2010A;B]

1.2 Struktur der Arbeit

Abbildung 2 veranschaulicht die Struktur der Arbeit und gibt einen Überblick über die Kernpunkte, deren Zusammenhänge sowie Wirkprinzipien. Zur einfacheren Nachvollziehbarkeit der Arbeit sind verschiedene Bereiche des Inhalts gegliedert aufgeführt. Orange eingefärbte Teilbereiche entsprechen bereits bestehendem Wissen, blaue Strukturen kennzeichnen eigene Arbeiten und Forschungsansätze bis hin zum Ergebnis dieser Arbeit.

Zu den Kernpunkten des „Experimentellen Forschungsaufbaus“ wurden umfangreiche Entwicklungen hinsichtlich der Hardware, der Software und der Kalibrierung realisiert und durch studentische Arbeiten ergänzt. Weitere durch den Autor betreute Arbeiten fanden im Bereich der „Empirie“ und teilweise bezüglich der Modellierung der gewonnenen Daten statt. Eine Übersicht der betreuten Arbeiten ist Tabelle 40 des Anhangs zu entnehmen.

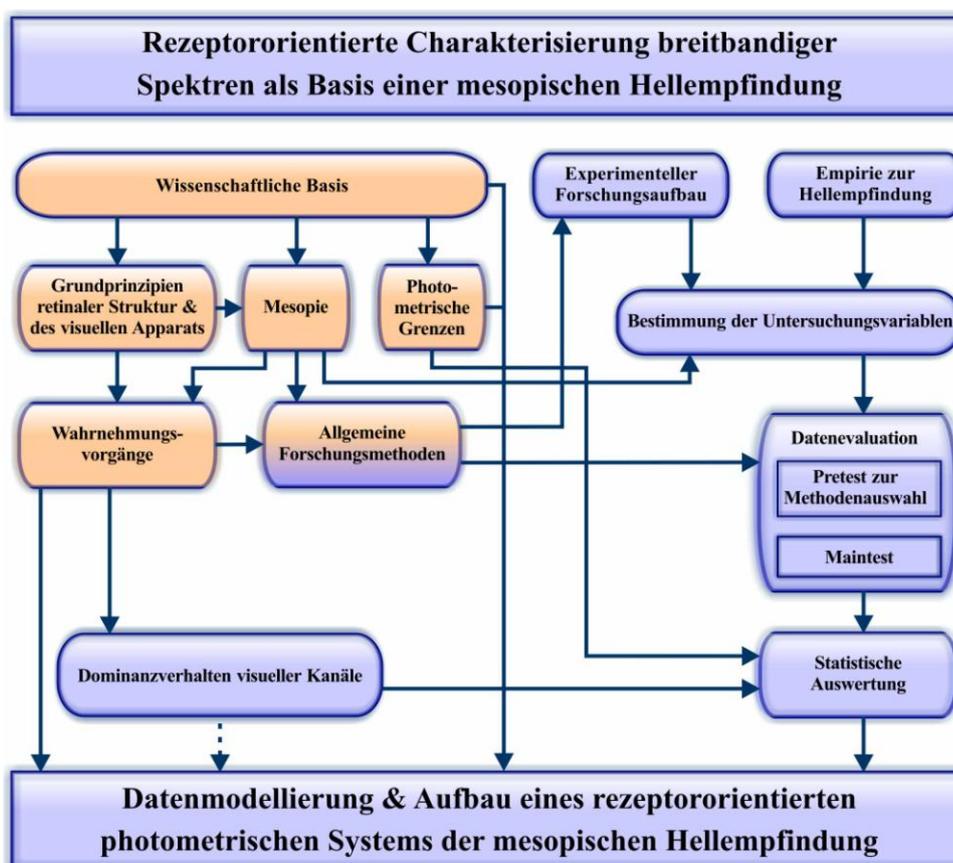


Abbildung 2: Struktur der Arbeit nach Schwerpunkten (orange: bestehender wissenschaftlicher Hintergrund; blau: eigene Forschungsarbeit)

KAPITEL 2

GRUNDLAGEN ZUR PHYSIOLOGIE DES VISUELLEN APPARATES

Im Zentrum der wissenschaftlichen Arbeit im mesopischen Bereich steht der Mensch, genauer das visuelle System von der Eintrittsfläche elektromagnetischer Strahlung durch die Hornhaut bis hin zur Verarbeitung der Informationen im visuellen Kortex, welchem es sich zu widmen gilt. Diesbezüglich ist es unabdingbar, sich im Vorfeld mit eben jenen Vorgängen vertraut zu machen, um die in dieser wissenschaftlichen Arbeit gewonnenen Erkenntnisse besser verstehen zu können. In Anbetracht der Menge an existierenden wissenschaftlichen Grundlagen wird nicht auf den Aufbau des Auges eingegangen. Vielmehr ist es Ziel dieses Kapitels, Strukturen aufzuzeigen, welche einen direkten Einfluss auf die visuellen Vorgänge während des Dämmerungssehens haben.

Insbesondere werden im Verlauf dieses Abschnitts die retinale Struktur, deren Aufbau und Besonderheiten behandelt. Besondere Aufmerksamkeit ist hierbei den Rezeptoren an sich gewidmet.

Der Vorgang der Aufnahme elektromagnetischer Strahlung endet nicht in den retinalen Schichten. Insofern ist ein Blick auf Prinzipien des Sehvorgangs wichtig, um daraus sowohl Schlüsse für die Interpretation von Ergebnissen zu ziehen, als auch wahrnehmungsphysiologische Phänomene einbeziehen zu können. Durch die Besonderheit der Reiz-Empfindungs-Funktion, wie sie im Mesopischen etabliert ist, ist der Adaptationsvorgang zu erwähnen, obwohl es bisher noch keine einheitlichen Vorstellungen gibt, welche Reizkriterien in Gänze auf die Adaptation Einfluss nehmen.

Im Speziellen werden sinnvolle Theorien zur Eingrenzung des Begriffs Hellempfindung aufgezeigt und bewertet.

Zum Ende des Kapitels 2 wird in Anbetracht des demographischen Wandels der Bevölkerungsstruktur auf gerontologische Besonderheiten und Veränderungen hingewiesen, welche durchaus einen Einfluss auf die untersuchte Hellempfindung haben können.

Auf eine tiefere Auseinandersetzung mit der Verarbeitung von Reizen in höherkortikalen Schichten des menschlichen Gehirns wird verzichtet, da diese insbesondere wahrnehmungspsychologischer Natur sind und nicht als Bestandteil der hier unternommenen Forschung gelten.

2.1 Retinale Struktur

Das Auge kann als Tor des Gehirns zur visuellen Umwelt bezeichnet werden. Die erste aktive Verarbeitung von Reizen findet in einer Zellschicht statt, welche fast die komplette Innenoberfläche des Glaskörpers bedeckt – der Retina.

Die Retina ist von erstaunlicher Vielschichtigkeit und durch ein hochkomplexes System an Zellstrukturen gekennzeichnet. Abbildung 3 gibt einen schematischen Überblick des Aufbaus.

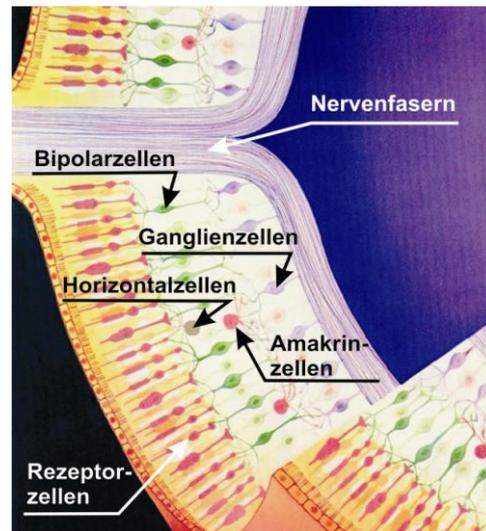


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der retinalen Zellschichten (modifiziert) [vgl. IRIDOLOGY 1982]

Anhand der Struktur lässt sich ein schichtweiser (outer plexiform layer, inner nuclear layer, inner plexiform layer) Aufbau erkennen. Neben den Rezeptorzellen (Stäbchen und Zapfen) befinden sich weiterhin Horizontalzellen (1-4 Typen) und Amakrinzellen (22-30 Typen) in der Retina. Beide sind für eine horizontal-neuronale Verschaltung der jeweils über diesen liegenden Zelltypen verantwortlich. Für die Rezeptoren sind das die Horizontalzellen, für die Ganglienzellen die Amakrinzellen. Jene für die Verschaltung verantwortlichen Zelltypen sind zur Ausbildung perzeptiver Felder imstande. Weiterhin ist eine Vertikalverschaltung der Rezeptorzellen über die Bipolarzellen (11 Typen) zu den oberen Zellschichten, in welchen sich die Ganglienzellen (20 Typen) befinden, vorhanden. Die Signalübertragung findet über die Nervenfasern statt. Diese sind wiederum mit den Ganglienzellen verbunden. Über jene schichtweise Verschaltung findet bereits eine Vorverarbeitung der eigentlichen Rezeptorsignale statt. Der genannte Vorgang erfolgt keinesfalls unidirektional von den Rezeptorzellen zu den Nervenfasern, sondern unterliegt einem komplexen Kreisprozess zwischen der horizontalen und vertikalen Signalverarbeitung. Es finden insbesondere Rückkopplungen zwischen den Horizontalzellen und der inneren plexiformen Schicht statt und modulieren die Signale der Photorezeptoren in Abhängigkeit der Stärke des Lichtreizes. Somit wird eine höhere Sensitivität gegenüber wenig Licht erzielt und vice versa. Eine ähnlich verschaltende Funktionsweise kommt den Amakrinzellen zu, welche jedoch die Verbindung der Bipolarzellen mit den Ganglienzellen herstellen. Anzumerken ist, dass seit kurzer Zeit zwischen weiterverarbeitenden Ganglienzellen und „rezeptiven“ Ganglienzellen zu unterscheiden ist. Letztere Art kennzeichnet sich durch eine überdimensionale Größe und ist unabhängig vom Input der Zapfen und Stäbchen. Diese Variante ist mit dem circadianen Effekt in Verbindung zu bringen. [vgl. KOLB 2003]

Eine weitere Besonderheit der Retina bildet die Makula Lutea (gelber Fleck), welche eine besonders starke Pigmentierung des Farbstoffs Lutein aufweist. Dessen maximale spektrale Absorption liegt bei $\lambda=460$ nm [JAMESON 1972]. Dadurch wird der Schutz der Retina vor energie-

reicher, kurzwelliger Strahlung und daraus folgenden photochemischen Schäden gewährleistet. Des Weiteren werden die durch die chromatische Abberation entstehenden Zerstreungskreise minimiert, wodurch sich ein positiver Effekt auf das Sehen einstellt [vgl. BERKE 1999].

Anzumerken ist, dass die Dichte der Pigmentierung starken interindividuellen Schwankungen unterliegt und einen Einfluss auf die Empfindung kurzwelliger Spektralanteile hat. Insbesondere ist diesbezüglich die Abhängigkeit der Dichte in Bezug auf den Stimulusfelddurchmesser zu beachten. Eine stärkere Pigmentierung führt zu einer geringeren Transmission kurzwelliger Spektralanteile, wobei die Position oder die Ausdehnung der Sehaufgabe zusätzlich einen Einfluss auf die Empfindung hat (Abbildung 4).

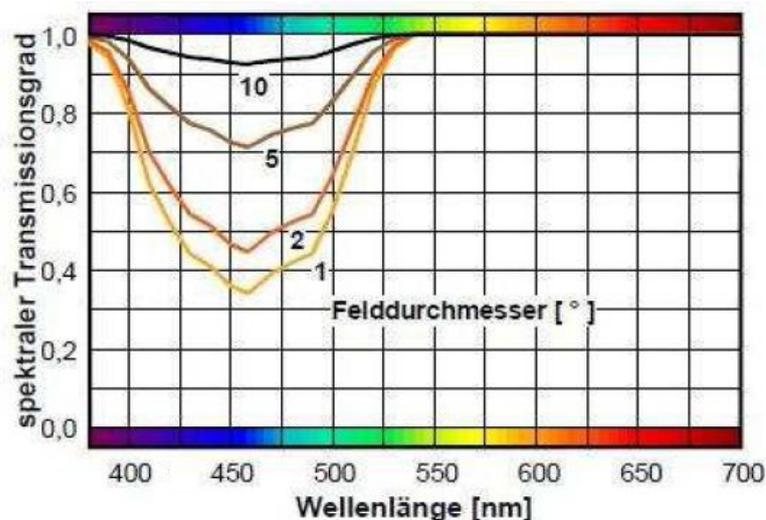


Abbildung 4: Spektraler Transmissionsgrad der Makula Lutea in Abhängigkeit der stimulierten Netzhautgröße [SCHIERZ 2007]

Fällt Licht⁶, also der sichtbare Anteil des elektromagnetischen Spektrums, durch unser Auge auf die retinale Rezeptorebene, werden die vormals elektromagnetischen Reize durch Transduktion in bioelektrische Reize umgewandelt. Zur Gewährleistung dieser Transformation sind Sehpigmente notwendig, die sogenannten Opsine⁷ [vgl. SCHMIDT 2006].

Generell lassen sich die zum Seheindruck führenden Rezeptoren, der Dublizitätstheorie⁸ von KRIES (1896) folgend, in zwei Rezeptorarten unterteilen: die Stäbchen (skotopisches Sehen) und die Zapfen (photopisches Sehen). Insgesamt befinden sich in der Netzhaut ca. 125 Millionen Stäbchen, welche sehr licht- und frequenzempfindlich sind, und ca. 6 Millionen Zapfen, die sich durch die Empfindlichkeit für Lichtreize hoher Intensität auszeichnen. Aufgrund der selektiven Wellenlängenempfindlichkeit von drei Zapfentypen ist eine Farbempfindung für den Menschen möglich [vgl. KITTNER 1994].

⁶ Der definierte Wellenlängenbereich von Licht bewegt sich zwischen 380 nm und 780 nm [DIN84].

⁷ Stäbchen: Rhodopsin | Zapfen: Ganopsin, Porphyropsin, Jodopsin

⁸ Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auch die interessante Dominator-Modulator-Theorie nach GRANIT (1943) genannt. Diese besagt, dass in der Netzhaut ein Dominator- und ein Modulatorsystem existiert. Das skotopische und photopische Dominatorsystem reagiert hierbei bei jeder beliebigen Frequenz, wobei das Modulatorsystem (bestimmte Zapfen) nur auf bestimmte Frequenzbereiche mit Farbempfindungen reagieren [VGL. KITTNER 1994].

Betrachtet man die Ansichten von GRANIT genauer, kann man feststellen, dass es im Rezeptorsystem des Auges sehr wohl Modulationssysteme gibt, welche vergleichend mit KOLB jedoch nicht nur auf die Stäbchen und Zapfen an sich zurückzuführen sind.

Die Zapfentypen unterscheiden sich je nach spektralem Absorptionsmaximum in S-(short), M-(middle), L-(long) Zapfen und wurden 1983 mittels Mikrospektrophotometrie anhand von sieben Probanden erhoben [vgl. DARTNALL 1983]. Die maximale spektrale Empfindlichkeit der Zapfen liegt bei $\lambda_{\max S}=441$ nm, $\lambda_{\max M}=541$ nm und $\lambda_{\max L}=566$ nm [STOCKMAN 1999 & 2000].⁹ In Tabelle 1 sind Bereiche der maximalen spektralen Empfindlichkeit definiert.

Zapfentyp	Maximaler spektraler Empfindlichkeitsbereich
S-Typ	420-440 nm
M-Typ	530-550 nm
L-Typ	560-580 nm

Tabelle 1: Maximale spektrale Empfindlichkeitsbereiche der Zapfenrezeptoren [KOKOSCHKA 2003]

Betrachtet man die Opsine und die Rezeptorbeschaffenheit genauer, können signifikante Unterschiede zwischen den Zapfen und den Stäbchen festgestellt werden (Abbildung 5). Trotz der gleichen Erscheinungsweise der Zapfen gibt es erhebliche Unterschiede der Absorptionskurven zwischen den S- sowie den M- und L-Zapfen, welche eine breite wellenlängenabhängige Überlappung aufweisen.

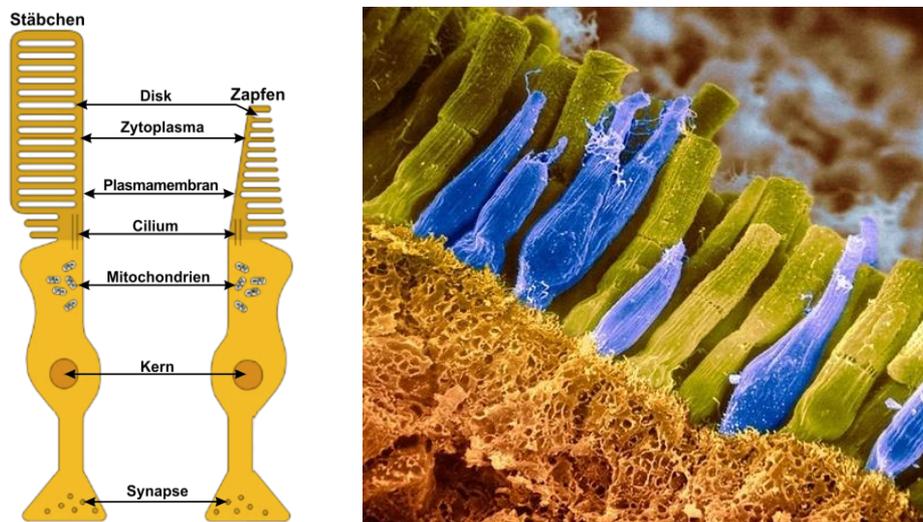


Abbildung 5: Unterschiede im Stäbchen- und Zapfenaufbau (links: Aufbau [mod. JÜLICH 2004]; rechts: Falschfarbenbild (grün: Stäbchen, blau: Zapfen) [OMIKRON 2010])

Eine geschlechtsspezifische Besonderheit ist bei den L-Zapfen festzustellen. Es existieren zwei L-Zapfen Subtypen, welche sich in ihren Maxima der spektralen Empfindlichkeit um 4-7 nm [NEITZ ET AL. 1991], 4,3 nm [MERBS ET AL. 1992A,B], 7 nm [ASENJA ET AL. 1994] und ggf. 2-4 nm [SHARPE ET AL. 2005] unterscheiden. MERBS & NATHANS geben an, wo ein jeweiliges Maximum der Empfindlichkeit zu suchen ist. Für L_{Alanin} ist dies bei $\lambda_{\max La}=552,4$ nm und im Fall von L_{Serin} bei $\lambda_{\max Ls}=556,4$ nm. Im Erbgut ist die Veranlagung zur Ausbildung des jeweiligen Rezeptorpigments auf dem X-Chromosom verankert. Dem folgend besitzen 43,7 % der Männer einen L_{Alanin} und 56,3 % einen L_{Serin} Typus [vgl. SHARPE ET AL. 1999]. Die weibliche Spezies ist differenzierter zu betrachten. Auch hier kommt es zur Herausbildung von jeweils einem annähernd gleichen Teil beider Typen (homozygotic). Gleichzeitig tragen jedoch 50 Prozent der Frauen beide L-Zapfen Subtypen (heterozygotic) [vgl. NEITZ ET AL. 1998].

⁹ Wissenschaftliche Studien differieren in den Angaben der maximalen spektralen Empfindlichkeit. So sind beispielsweise Angaben von $\lambda_{\max S}=419$ nm, $\lambda_{\max M}=531$ nm und $\lambda_{\max L}=558$ nm [GOLDSTEIN 2002] und $\lambda_{\max S}=440$ nm, $\lambda_{\max M}=530$ nm und $\lambda_{\max L}=560$ nm [Palmer 2002] genannt.

Neben den Rezeptoren selbst bildet die Verteilung der Zapfen und Stäbchen über der Retina die Basis der Verarbeitungsmechanismen einer visuellen Wahrnehmung. Die beiden Rezeptorarten weisen auf der Retina eine inhomogene Verteilung auf. Mithin lassen sich primär zwei Bereiche identifizieren, der foveale und der periphere Bereich. Eine Darstellung der Rezeptorverteilung findet sich in Abbildung 6.

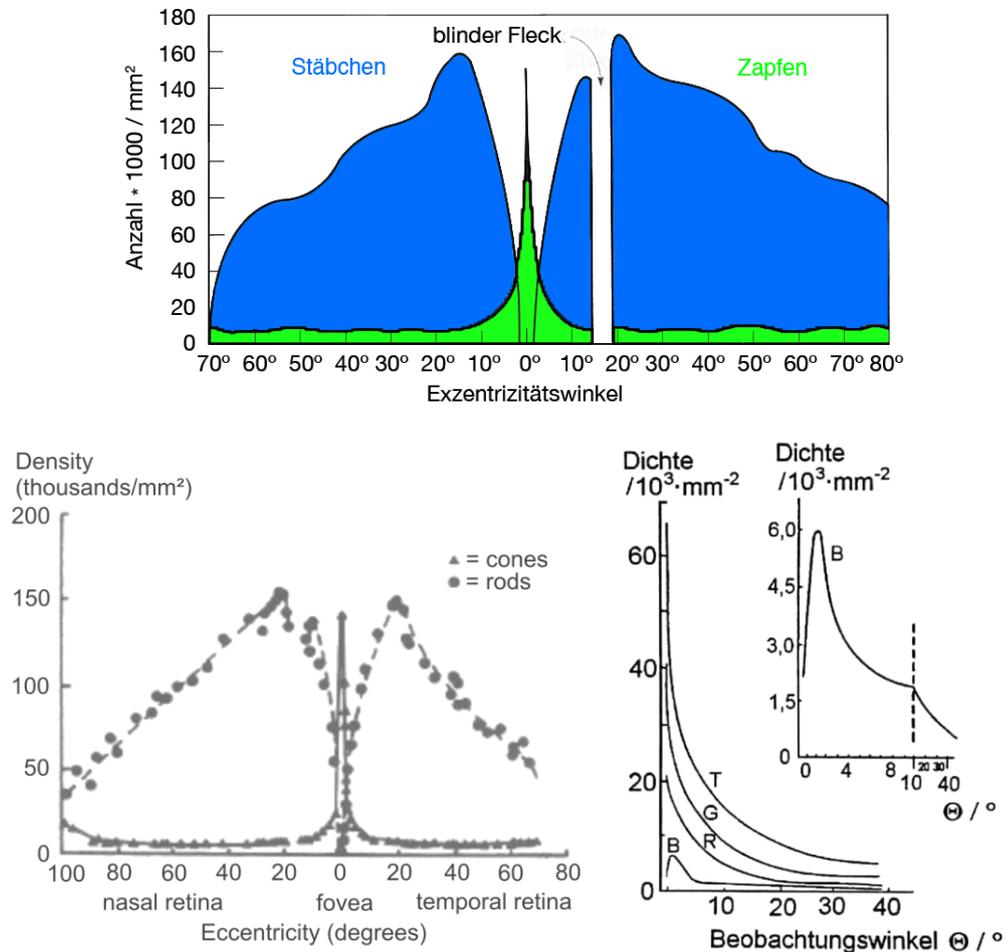


Abbildung 6: Rezeptorverteilung in der Retina (transversaler Schnitt) mit detailliertem Überblick der Rezeptorverteilung je Zapfentyp (T: Gesamtanzahl, G: M-Zapfen, R: L-Zapfen, B: S-Zapfen; oben: [mod. OSTERBERG 1935], unten links: [BOYCE 2003], unten rechts: [SPERLING 1980])

In der Fovea ist die höchste Zapfendichte auffindbar. Durch diese im Allgemeinen 2° Sehinkel umfassende Fläche ist das scharfe Sehen charakterisiert. Der Bereich des schärfsten Sehens wird als Fovea Centralis bezeichnet und liegt im Zentrum der Makula Lutea. Dieses Gebiet ist durch eine Ausdehnung von ca. 1,25° charakterisiert und als stäbchenfrei zu bezeichnen. Es herrscht eine Zapfendichte von etwa 162000 Zellen/mm². Eine Zone, die sich nur durch die Anwesenheit von M- und L-Zapfen beschreibt, ist die Foveola (0,35° Sehinkel) in der Mitte der Fovea Centralis. Dort ist die höchste Zapfendichte mit ca. 200000 Zellen/mm² zu verzeichnen. Die höchste S-Zapfendichte (>2000 Zellen/mm²) herrscht in einem Abstand von 0,1-0,3 mm vom Zentrum vor [vgl. CURCIO 1990]. Vergleicht man diese Zahl mit den Angaben von SPERLING, liegt die höchste Dichte der „blau“-sensitiven Zapfen mit circa 6000 Zellen/mm² bei 1° Exzentrizität [vgl. SPERLING 1980].

Mit steigender Exzentrizität nimmt die Zapfendichte von der Fovea ausgehend stetig ab und nähert sich bei 10° Sehwinkel einem konstanten Niveau. Den einzigen Unterschied bildet die um 40-45 % höhere Zapfendichte in der nasalen Netzhauthälfte im Gegensatz zur temporalen, wobei die Differenz zwischen oberer und unterer Netzhauthälfte als marginal anzusehen ist [vgl. BERKE 1999]. Die maximale Dichte der Stäbchen ist mit schätzungsweise 176000 Zellen/mm² in einer ringförmigen Verteilung bei ca. 18° Sehwinkel (3-5 mm) zu finden [vgl. CURCIO 1990]. Der Austrittsort des Sehnervs zum Gehirn (Papille, Blinder Fleck) ist frei von jeglichen Rezeptoren. Die farbcodierte Darstellung der Zapfendichte stammt aus CURCIO (1990) und ist das Ergebnis aus der Vermessung von acht Retinae (Abbildung 7).

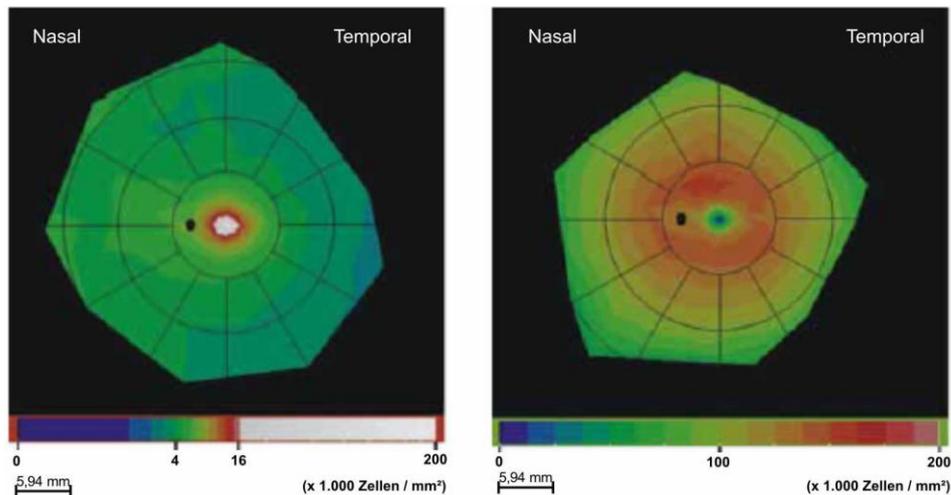


Abbildung 7: Farbcodierte Darstellung der retinalen Zapfendichte (links) und der Stäbchendichte (rechts) (schwarzer Punkt kennzeichnet den Blinder Fleck) [CURCIO 1990]

Nach BERKE (1999) wird den Zapfen eine Häufigkeitsverteilung von M:L:S=55:33:12 % zugeschrieben. Eine intraindividuelle Bewertung lässt den Schluss zu, dass sich die Anzahl der Zapfen und Stäbchen mit einer maximalen Abweichung von 8 % in beiden Augen als gleich groß darstellt, wobei die interindividuelle Verteilung der Rezeptoren erhebliche Unterschiede aufweist [vgl. CURCIO 1990]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch KANU ET AL. (2000), welche mittels Heterochromatischer Flicker Photometrie anhand von fünf Probanden die Verhältnisse von L:M-Zapfen verschiedener Exzentrizitäten untersuchten. Es ist eine Konstanz der betrachteten Rezeptorverhältnisse über alle Exzentrizitäten einer Person festgestellt, jedoch variieren die interindividuellen Werte von 0,9:1 bis 3,4:1 [vgl. KANU 2001].

Allein die Verdeutlichung des Umfangs des zu regelnden visuellen Dynamikbereichs von über elf Dekaden, lässt im Ansatz die Komplexität des Sehens erahnen. Damit das Auge bei jedem Lichtreiz einen optimalen Wahrnehmungszustand erreicht, ist das Mosaik an Photorezeptoren mit zwei unterschiedlichen Arten von Detektoren ausgestattet [vgl. STERLING 2003].

Zusammenfassend wird zwischen Stäbchen und Zapfen differenziert, die sich in der jeweiligen Empfindlichkeit unterscheiden. SCHNEEWEIS & SCHNAPF bestätigen in Ihren Untersuchungen, dass bei absoluter Dunkeladaptation bereits die Detektion einzelner Lichtquanten durch das Stäbchensystem möglich ist. Zapfen dagegen reagieren erst ab ca. 100 Photonen pro Summationszeit (20 ms) [vgl. SCHNEEWEIS 1995; STERLING 2003]. Eine stetig optimale Wahrnehmung ist somit nur durch spezielle Verschaltungen und begleitende Transformationsprozesse zu erreichen. Neben getrennten Verarbeitungsprozessen von Stäbchen und Zapfen findet gleichsam eine Differenzierung der Prozesse zwischen den S-Zapfen sowie M- und L- Zapfen statt. Zurückzuführen ist dies scheinbar auf erheblich ältere evolutionäre Vorgänge in Bezug auf die kurzweilig empfindlichen Rezeptoren [vgl. KOLB 2003; CURCIO 1991].

Abschließend lässt sich festhalten, dass eine visuelle Wahrnehmung, gleich welcher Art, in erster Linie von der retinalen Struktur und den folgenden Prozessen abhängig ist, wobei die jeweilige Exzentrizität und damit die stimulierten Rezeptoren eine substanzielle Rolle einnehmen. An dieser Stelle lassen sich mit wachsendem Interesse die Fragen formulieren, warum im Auge ein Rezeptorverhältnis von etwa 20 Stäbchen zu einem Zapfen herrscht? Wäre es nicht besser die Zapfenanzahl zu erhöhen, um einen erweiterten Bereich des scharfen Sehens zu erreichen? Ergäbe sich ein Vorteil, wenn auch die letzten fünf Prozent der Zapfen durch Stäbchen ersetzt wären, da gerade im skotopischen Bereich die Photonenzahl für die potentielle Absorption spärlich ist? Für das Stäbchensystem sind einzeln auftreffende Photonen so selten, dass Ganglienzellen mehr als 10000 Stäbchensignale zusammenfassen. Bedeckten die Stäbchen auch das von Zapfen bedeckte Areal, würde das Signal-Rausch-Verhältnis nur um 2,6 % steigen. Die unmittelbare Folge stellt sich im Verlust des Tagsehens dar. Im Gegensatz dazu verhält es sich mit dem Zapfensystem, welches unter hohen Lichtstärken funktioniert, einem Zustand in welchem eine Vielzahl von Photonen in der Umwelt vorhanden sind. Eine durchschnittliche Ganglienzelle fasst circa 500 Zapfensignale in einem Transduktionsprozess von je annähernd 1000 Photonen zusammen. Das vorliegende Signal-Rausch-Verhältnis liegt bei 700, somit um ein vielfaches höher als bei den Stäbchen, ermöglicht jedoch das Farb- und Tagsehen. Ergo besitzen beide Rezeptorsysteme in ihrer spezifischen Ausprägung eine Existenzberechtigung [vgl. STERLING 2003].

Der Einbezug des Aspekts einer allgemeingültigen Beschreibung visueller Eindrücke ist interindividuell schwer und nur unter Restriktionen zu realisieren. Die aufgeführten Angaben zu einzelnen Rezeptormengen und Abgrenzungen von Retinaarealen sind aufgrund der Schwierigkeit in der Bestimmung und bezüglich der dargelegten individuellen Unterschiede mit zum Teil erheblichen Varianzen behaftet. Wie im Verlauf dieses Kapitels beschrieben, ist eine marginale intraindividuelle Varianz zu erwarten. Durch die Diskrepanz der spezifischen Ausprägung von L-Zapfen ist ein Effekt bezüglich des Geschlechts auf die Wahrnehmung von Helligkeiten und Farben nicht auszuschließen.

2.2 Prinzipien des Sehvorgangs

In der Foveola sind direkte Verschaltungen der Rezeptoren zu höheren retinalen Verarbeitungsschichten präsent. Beim Abfall der Reizintensität ist es notwendig, die stäbchendominante Peripherie in einem arbeitsfähigen Zustand zu halten und einzelne Photonen zu detektieren, folglich die Absorptionswahrscheinlichkeit zu erhöhen. Diesbezüglich findet mit zunehmender Exzentrizität sowie mit abnehmendem Adaptationsniveau die Herausbildung von perzeptiven Feldern¹⁰ statt, einem Zusammenschluss von Rezeptoren oder Rezeptorarealen, um die Absorptionswahrscheinlichkeit einzelner Photonen zu erhöhen. Als perzeptives Feld bezeichnet man die Umgebung einer Ganglienzelle, aus welcher sie abgeleitete Potentiale von Photorezeptoren erhält.

¹⁰ Perzeptive Felder werden vornehmlich als rezeptive Felder bezeichnet. Verwendung findet in dieser Arbeit der Begriff perzeptives Feld, da in der Forschung am Menschen eine subjektive Rückmeldung des Reizes als Wahrnehmung erfolgt und nicht wie bei Tieren aktiv in die retinalen Schichten mittels Elektroden, eingegriffen wird.

JUNG & SPILLMANN beschreiben, dass ein perzeptives Feld die psychophysikalische Entsprechung zum neurophysiologisch ermittelten rezeptiven Feld ist. Es wird perzeptiv genannt, weil es auf perzeptuelle Phänomene und psychophysikalischen Messungen von Schellen beruht. [vgl. JUNG 1970]

Anders ausgedrückt ist das perzeptive Feld eines Neurons derjenige Bereich auf der Rezeptoroberfläche der Retina, der bei einer Reizung die Entladungsrates dieses Neurons beeinflusst [vgl. GOLDSTEIN 2002]. Eine Differenzierung der Ganglienzellen erfolgt über drei Typen mit eigener Charakteristik. Die M-Zellen (magnozellular) zeichnen sich durch eine erhöhte Dicke aus, wodurch Signale schneller weitergeleitet werden. Sie sind weitverzweigt, empfindlich für schnell wechselnde Stimuli (phasisch) sowie kleine Bestrahlungsstärken und dominieren die Peripherie der Netzhaut. Die P-Zellen (parvozellular) bilden kleine Feldzentren, vor allem in der Fovea und Parafovea aus. Sie sind besonders für kleine Lichtflächen und Farbinformationen empfindlich, haben eine höhere räumliche, jedoch geringe zeitliche Auflösung (tonisch). K-Zellen (koniozellular) haben ähnliche Eigenschaften wie die P-Zellen, sind jedoch kleiner und dem Pupillenregelkreis angeschlossen. Die drei Klassen treten durchschnittlich im Verhältnis von M:P:K=10:80:10 Prozent auf. [vgl. BOYCE 2003; SCHMIDT 2007].

Je höher das kortikale Areal, zu welchem das Neuron gehört, einzuordnen ist, desto komplexer gestaltet sich das perzeptive Feld, wobei je nach Spezifizierung (Orientierung, Muster, Reizlänge) einfache bis hyperkomplexe Strukturierungen entstehen [vgl. BERKE 1999]. Abbildung 8 verdeutlicht den biologisch-visuellen Pfad beginnend bei den Photorezeptoren zu den Kortikalzellen höherer Ordnung und zeigt eine Kompression der visuellen Information mit Erreichen der nächsthöheren kortikalen Schicht.

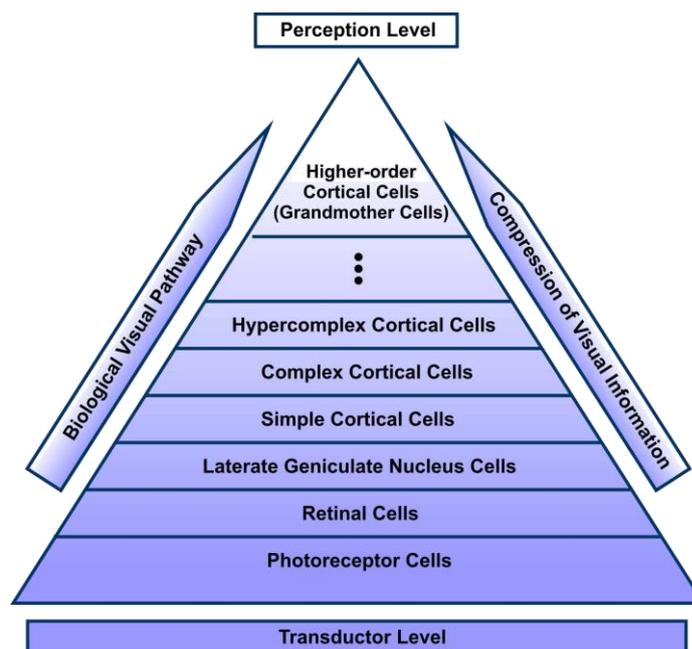


Abbildung 8: Biological visual pathway (modifiziert und vereinfacht) [vgl. GUPTA 1995]

In der Retina sind perzeptive Felder nahezu kreisförmig und können sich überlagern. Bei diesen unterscheidet man zwei Haupttypen, einen On-Zentrum-Typ mit Off-Umfeld und einen Off-Zentrum-Typ mit On-Umfeld. On-Typen werden durch Erregung der Feldmitte mittels Licht stimuliert und es findet eine Erregung statt, wodurch Aktionspotentiale entstehen. Trifft Licht auf das Off-Umfeld tritt eine Hemmung ein. Umgekehrt ist dies bei Off-Typen, wobei eine Hemmung des Zentrums stattfindet [vgl. STÖLDT 2003]. Perzeptive Felder sind jedoch nicht nur in Ganglienzellenanordnung vertreten, sondern gleichfalls bei den horizontal verschaltenden Amakrin- und Horizontalzellen. Insbesondere in der Ausdehnung unterliegen die zusammengesetzten Rezeptoren Restriktionen in Abhängigkeit von der retinalen Lokalisierung und der Reizstärke [vgl. KOLB 2003; BOYCE 2003; WILSON 1970].

Die Ausdehnung der perzeptiven Feldorganisation kann über Methoden der Hermann-Gittertäuschung und des Westheimer-Paradigmas bestimmt werden. SPILLMANN fand für die Fovea eine Flächengröße von 5' für das Feldzentrum und 18' für das Umfeld inclusive des Zentrums [vgl. SPILLMANN 1963, 1971]. Infolge peripherer Abbildungen erweitern sich die Feldgrößen von 1,5° bei einer Exzentrizität von 15° auf das Doppelte bei 30° Exzentrizität [vgl. LINGELBACH 2002]. Während genaue Feldgrößen zu Zentren und deren Umfeldern je nach verwendeter Forschungsmethode schwanken, ist gesichert, dass es eine Abhängigkeit vom Leuchtdichteadaptationsniveau gibt. Vom photopischen zum skotopischen Sehen nimmt die Feldausdehnung der Zentren zu [vgl. RANSOM 1980].

Über die gesamte Retina konvergieren die Stäbchen (120:1) sehr viel stärker als die Zapfen (6:1), wobei die 1:1 Verschaltung von Rezeptor auf Ganglienzelle eine Eigenschaft von fovealen Bereichen bleibt. Die Konvergenz der Stäbchen ist für die geringe räumliche Auflösung kennzeichnend, führt jedoch zu einer Steigerung der Empfindlichkeit und Frequenzauflösung.

Prinzipiell folgt die Signalverarbeitung der Retina zwei Prämissen. Zum einen wird das Signal komprimiert und mit Bandpässen gefiltert und zum anderen das gefilterte Signal nochmals zerlegt und über parallele Schleifen bestimmter Charakteristika weitergeleitet. Herauszugreifen ist, dass schwache Stäbchensignale einen eigenen, nichtlinearen Kanal nutzen, wobei stärkere Zapfen- und Stäbchensignale sich einen linearen Schaltkreis teilen [vgl. STERLING 2003].

Innerhalb der Retina beschreibt STERLING drei Verschaltungen als finale Verarbeitungswege zu den Ganglienzellen (Abbildung 9). Kernaufgabe jedes Signalweges ist es, im eingeschwungenen Zustand Signale (Photonen) zu detektieren und über das Rauschen des Systems zu heben, ergo detektierbar zu machen.

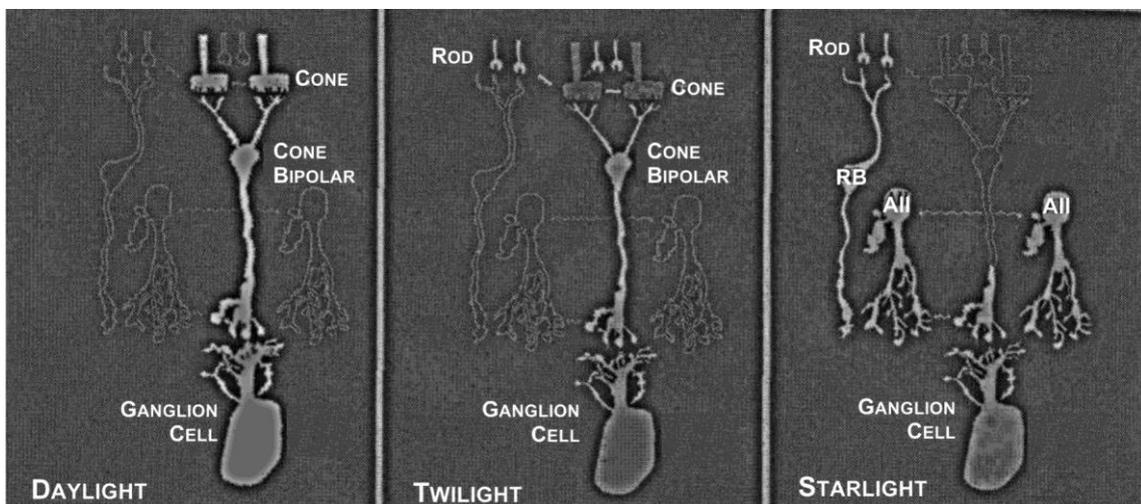


Abbildung 9: Retinale Signalwege in den drei Bereichen des menschlichen Sehens (RB: Ribbon Synapse; AII: Amakrinzelle) [STERLING 2003]

Während die Signalweiterleitung bei den statischen Zuständen (photopisch, skotopisch) von je einer Rezeptorart über beliebig komplexe Vorgänge erfolgt, sind im Zwischenbereich (mesopisch) Inputs von Stäbchen und Zapfen vorhanden, welche nur einen Weiterleitungskanal nutzen.

Für eine einfachere Beschreibung der Wahrnehmungsvorgänge, insbesondere für die Helligkeits- und Farbempfindung, ist der Abstraktionsgrad, die beschriebenen Verarbeitungsvorgänge betreffend, zu erhöhen. Als Basis dienen die Theorien von YOUNG-HELMHOLTZ (um 1850) und HERING (um 1878). Während die Dreikomponenten-Theorie des Farbsehens die retinale Vorstellung von drei Empfängern (Zapfen) verdeutlicht, geht die Vierkomponenten-Theorie von einer schon „verschlüsselten“, höherkortikalen Erregung aus. HERING beschreibt in seiner Theorie,

dass es insgesamt drei Empfindungsdimensionen gibt, welche das Hellempfinden (schwarz-weiß) und die Gegenfarbenkomponenten Rot-Grün und Gelb-Blau versinnbildlichen. Grundlage dieser Ansicht, auf welcher die derzeit gültige und stark vereinfachte Auffassung der Signalverarbeitung beruht, bilden dennoch die im Auge befindlichen Rezeptoren. Kernpunkt neurophysiologischer Untersuchung ist jedoch, dass alle Signalinputs gegeneinander „abgewogen“ werden und Umwandlung in ein chromatisches Helligkeitssignal finden, welches neben dem Chrominanzsignal existiert [vgl. RICHTER 1980].

Unter mesopischen Bedingungen muss ein Stäbchenbeitrag zur Hellempfindung Beachtung finden, wodurch sich genannte Theorien um eben jenen Beitrag erweitern. In folgendem Blockdiagramm sind Ansätze von RAPHAEL und FULTON integriert. Es gibt einen Überblick über die Signalverarbeitungsarchitektur des visuellen Systems bezüglich der Kanäle der Luminanz und Chrominanz.

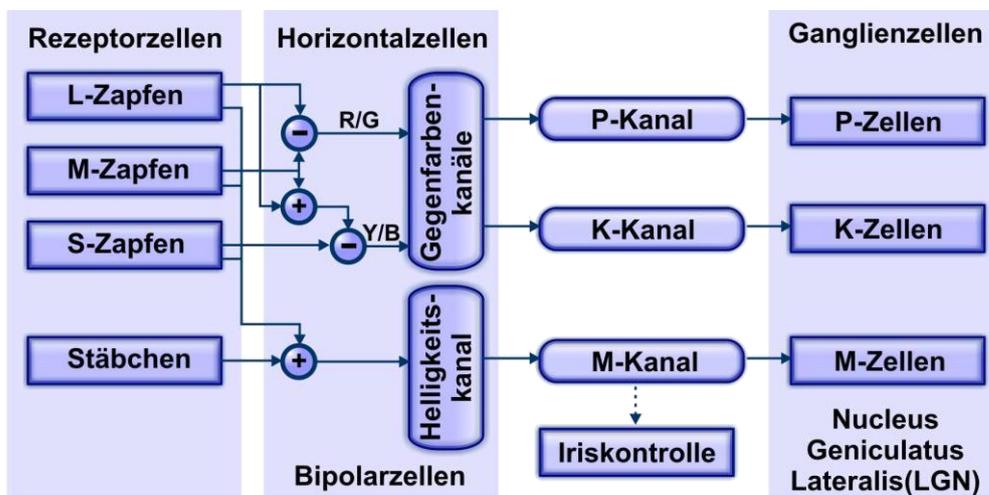


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Rezeptorartverschaltung zu Luminanz-(achromatisch) und Chrominanzkanälen unter mesopischen Bedingungen (R: Rot; G: Grün; Y: Gelb; B: Blau) [modifiziert nach RAPHAEL 2010; FULTON 2009; SCHIERZ 2010]¹¹

Die vorangegangene Visualisierung verdeutlicht eine stark vereinfachte Verschaltung und Signalweiterleitung des visuellen Systems. Wie in Kapitel 2.1 aufgezeigt, existieren 20 Typen von Ganglienzellen, wodurch die Vermutung nahe liegt, dass es durchaus zu Subprozessen im visuellen Kontext kommen kann. Bei der Übertragung der Prinzipdarstellung in den photopischen Bereich ist der Einfluss der Stäbchen zu streichen, beim skotopischen Sehen ist nur der Helligkeitskanal (Luminanzkanal) zu betrachten, welcher durch den alleinigen Input der Stäbchensignale gespeist wird. In den Chrominanzkanal gehen die Differenzsignale der Rezeptorzellen nach HERINGS Theorie ein, welche allerdings nicht dem Prinzip der Additivität unterliegen.

Im Fall des mesopischen Sehens bleibt die Funktionsweise des Chrominanzkanals gleich. Für den Luminanzkanal ergeben sich grundlegende Änderungen. Während das derzeit gültige photometrische System, beruhend auf der $V(\lambda)$ -Funktion, den Additivitätsgrundsatz erfüllt, jedoch nur im Photopischen Gültigkeit besitzt, kommt es im Mesopischen zu einem Input an Signalen aus dem Stäbchensystem. Der Grundsatz der Additivität ist nicht mehr erfüllt. Derzeit unterliegt die Auffassung des Beitrags der S-Zapfen zum achromatischen Helligkeitssignal einer stetigen Diskussion in wissenschaftlichen Arbeiten [vgl. EISNER 1980; CAVANAGH 1987; VERDON 1987].

¹¹ Für ein detailliertes Blockdiagramm der kompletten Verschaltung des visuellen Systems sei auf FOULTEN 2009 Kapitel 11.6.4 verwiesen.

Beispielsweise stellt auch RAPHAEL (2010) den Beitrag der kurzweilig empfindlichen Rezeptoren in Frage, wohingegen in dieser Arbeit von einem Einfluss aller Rezeptoren in Form eines chromatischen Beitrags zum Luminanzkanal ausgegangen wird (vgl. DRUM 1983; LEE 1989; STOCKMAN 1987, 1991; TREZONA 1970).

Photopisch ist dies durch neueste Untersuchungen von RIPAMONTI ET AL. belegt, in welchen zwei S-Zapfen-Isolationstechniken, allerdings nur an drei Probanden, getestet wurden. Die Techniken unterscheiden sich grundsätzlich durch die Verwendung eines chromatischen Umfelds. Während bei Nutzung des Umfelds eine chromatische Adaptation einsetzt, ist bei der zweiten Technik (silent substitution) ohne Umfeld keine chromatische Anpassung vorhanden. Untersucht wurde der Beitrag der S-Zapfen zum Luminanzsignal unter Verwendung der Heterochromatischen-Flicker-Photometrie (Kapitel 3.5). Kam ein langweilig dominantes Umfeld (610 nm) zum Einsatz, hatte dies die Stimulidetektierbarkeit der L&M-Zapfen (620 nm) und S-Zapfen (426 nm) zur Folge. „Silent substitution“ Untersuchungen nutzten Stimuli bei 620 nm und einem Reizpaar bestehend aus Wellenlängen bei 436 und 490 nm. Zielsetzung bei Nutzung des langweilig dominanten Hintergrunds ist, Reize des 620 nm Stimulus zu unterdrücken und damit ein Tor für die S-Zapfensignale zu öffnen, welche sonst überlagert werden. Ähnliches drückt die zweite Technik aus. Ein Stimulus aus „trianopic metamers“, welches für L&M-Rezeptoren nicht sichtbar ist, wird bei gleicher Leuchtdichte alternierend zum langwelligen Stimulus dargeboten und sollte nur von den S-Zapfen wahrnehmbar sein. Getestet wurden mehrere Kombinationen von Stimuli und Umfeldern (491-678nm) unter verschiedenen photopischen Konditionen. Zielsetzung war die Einstellung des Phasenunterschieds, sodass kein Flimmern zwischen den Stimuli erzeugt wurde. Somit hatte der Proband zuerst die eigene Flimmerreizschwelle (Frequenzen 5-25 Hz) zu suchen und danach die Phasendifferenz zwischen den Stimuli zu minimieren. Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass die Präsenz eines S-Zapfen-Beitrags zum Luminanzsignal stark vom Vorhandensein eines langwelligen Hintergrunds abhängt. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit Aussagen von EISNER & MACLEOD (1980). Wird der Hintergrund entfernt, hat dies zwar einen geringen direkten Einfluss auf die S-Zapfen, jedoch einen substantiellen auf die Anregung der L&M-Zapfen des langweilig dominanten Stimulus. Ist dennoch eine Aufrechterhaltung des Flimmerns (20Hz) zwischen den Stimuli gewollt, muss die Strahldichte um einige Dekaden verringert werden. Dies ist weder bei konventionellen flickerphotometrischen Untersuchungen erfolgt, noch bei der Technik der „silent substitution“. Ein Beitrag der kurzweilig empfindlichen Zapfen konnte somit nicht aufgezeigt werden. RIPAMONTI ET AL. vermuten, dass die Kanäle, durch welche die S-Zapfensignale geleitet werden, sich mit dem vorliegenden Adaptationslevel verändern. Verstärkend kommt die Annahme hinzu, wonach mit genannter Abhängigkeit der Weiterleitungskanäle auch eine Varianz des S-Zapfen Inputs einhergeht. Es herrscht allerdings Unklarheit darüber, wie eine solche Begründung physiologisch zu rechtfertigen ist. Bislang gehen die Autoren von einem Feedback der Horizontalzellen auf die Reizverarbeitung aus. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass ein Beitrag der S-Zapfen nachzuweisen ist, wenn dieser nicht durch die Inputs der L&M-Zapfen überlagert wird. Es herrscht eine starke Abhängigkeit vom Strahldichteniveau sowie der Präsenz von L&M-Input unterdrückenden Umfeldern vor. [vgl. RIPAMONTI 2009]

Weiterführend lässt dies die Schlussfolgerung zu, dass, nur weil diese unter Umständen nicht „sichtbar“ gemacht werden können, S-Zapfenanteile am Vorgang der Wahrnehmung einer Hellempfindung teilhaben. Insbesondere, da der Grad des Einflusses der S-Zapfen vom Strahldichteniveau und somit vom Adaptationsniveau abhängt, ist gerade im Mesopischen von einem zusammengesetzten 4-Komponentensignal der Luminanz auszugehen. Bestätigung findet diese Schlussfolgerung durch Untersuchungen von HOUGH & RUDDOCK (1969), nach deren Meinung

die S-Zapfen beim mesopischen Sehen eine entscheidende Rolle einnehmen. Kernpunkt der Forschungsarbeit ist der Vergleich von spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen zwischen Trichromaten und Tritanopen unter Anwendung der Methode der heterochromatischen Flimmerphotometrie. Darauf beruhend besteht kein Unterschied der Hellempfindlichkeitsfunktionen im Photopischen, wohl aber im Mesopischen [vgl. HOUGH 1969].

Detailliertere Ansätze für die Schilderung des Hellempfindens mit mesopischem Schwerpunkt, jedoch zusätzlich mit einer angestrebten Gültigkeit für den photopischen und skotopischen Bereich, beschreibt SAGAWA (Abbildung 11).

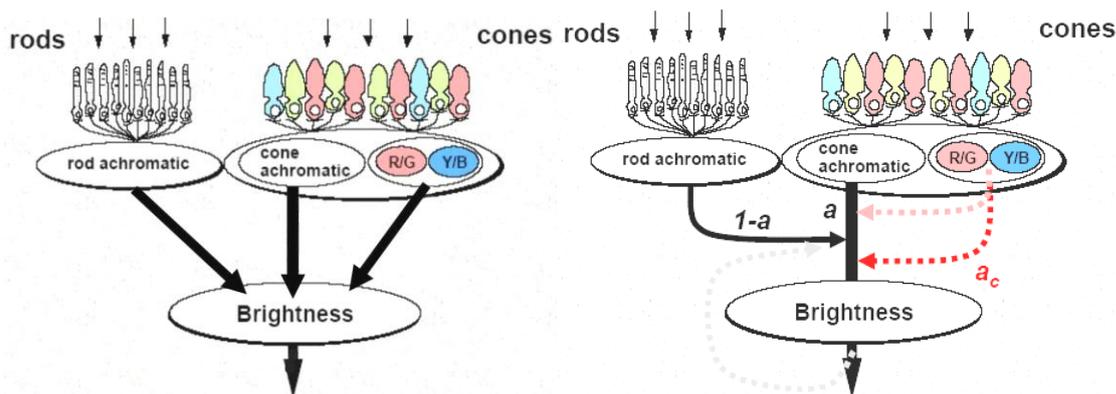


Abbildung 11: Basismodell (links) und erweitertes Modell (rechts) zur Hellempfindung (R: Rot; G: Grün; Y: Gelb; B: Blau; a: achromatischer Adaptationskoeffizient; a_c : chromatischer Adaptationskoeffizient) [SAGAWA 2005, 2007]

Das Basismodell unterscheidet prinzipiell drei Einflussfaktoren auf das Hellempfinden. Dies sind im Fall des mesopischen Sehens ein achromatischer Luminanzanteil durch die Stäbchen, welcher je nach Adaptationslevel unterschiedlich ist, sowie ein achromatischer Luminanzanteil von den Zapfen (PURKINJE-Effekt). Hinzu kommt ein mit den Umgebungsbedingungen variierender chromatischer Zapfenanteil. Eine Unterscheidung erfolgt somit zwischen achromatischen und chromatischen Beiträgen zum farblosen (achromatischen) Hellempfinden. Im erweiterten Modell wird bereits auf Adaptationsprozesse eingegangen. Es werden Regelungs- und Einflussaspekte aufgezeigt, wie eine Verarbeitung der Rezeptorsignale erfolgen kann. Alle Anteile zum Hellempfinden treffen folglich erst in einem Luminanzkanal zusammen und werden weitergeleitet bis sie zur Hellempfindung führen. Neben auftretenden Adaptationsprozessen (Leuchtdichteadaptation und chromatische Adaptation) findet ein iterativer Mechanismus zur Regelung des Hellempfindens statt. Dieser ist insbesondere durch wahrnehmungspsychologische Effekte bestimmt.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln diskutiert, ist der Ausgangspunkt für das menschliche Sehen in den Rezeptoren und deren höherretinalen und –kortikalen Verschaltungen zu suchen. Dabei ist es dem visuellen Mechanismus nicht möglich, den angesprochenen kompletten Dynamikbereich in situ abzudecken. Vielmehr benötigt es einen Vorgang der Anpassung an spezielle Verhältnisse, um Sehaufgaben in einem reduzierten Dynamikbereich zu erfüllen. Hierbei entspricht der Dynamikumfang von circa zwei Dekaden einem Sehen zwischen subjektivem Schwarz und der Blendungsfreiheit. Dieser Bereich entspricht neurophysiologisch der Frequenzbandbreite der Ganglienzellen, welche bei maximal einigen hundert Hertz liegt [vgl. KOKOSCHKA 2003]. Den Vorgang der Anpassung nennt man Adaptation (-svorgang) und die eingeschwungene Situation den Adaptationszustand.

KOKOSCHKA unterscheidet im Allgemeinen vier Adaptationsmechanismen, welche sich detailliert in Abbildung 12 wiederfinden:

1. Rezeptorbasierte Anpassung durch Zapfen und Stäbchen
2. Änderung der Sehstoffkonzentration innerhalb der Rezeptoren mit der Umfeldleuchtdichte
3. Neuronale Signalverarbeitung
4. Änderung der Pupillenweite mit der Umfeldleuchtdichte

Übersicht der Adaptationsfähigkeit						
Gesichtsfeld-Leuchtdichten		Mechanismen				
cd/m ²	Beispiele	Rezeptor-System	Sehstoff-Konzentration Abbau	Sehstoff-Konzentration Aufbau	Neuronale Schaltung Sofort-Adaptation	Pupille
100000	Tag Sonnenbeschienenes Schneefeld	Zapfen (photopisch)	1 Min.	↓	0,1 Sek.	2 mm ∅
10000			↑	0,1 Sek.		
1000			↓	1 Min.		
100	Dämmerung	Zapfen + Stäbchen (mesopisch)	↑	↓	↑	ca. 3 Sek.
10			↓	↑	↓	
1	Klare Vollmond-Nacht		5 Min.	↓		
0,1			↑	↓		
0,01	Nacht Bedeckter Himmel ohne Mond	Stäbchen (skotopisch)	30...60 Min.	↓		8 mm ∅
0,001			↑	↓		
0,0001			↓	↑		
0,00001						

Abbildung 12: Übersicht über Mechanismen und Einstellzeiten zur Adaptationsfähigkeit (hervorgehoben: mesopische Adaptationscharakteristiken) [mod. KOKOSCHKA 2003]

Da im Verlauf dieser Arbeit auf homogene Stimuli eingegangen wird, soll innerhalb dieses Abschnitts nur der Adaptationsvorgang für homogene Felder beleuchtet werden. Für inhomogene Felder sei es bei der Definition von CARRARO (1985) belassen. Wie ein Adaptationsmodell funktioniert, beschreibt FRY (1973) innerhalb eines Mehrebenenmodells. Kernpunkt ist Stufe 1. Sie beschreibt den photochemischen Prozess über den Auf- und gleichzeitigen Abbau der Sehstoffkonzentration, bis sich nach einer gewissen Zeit ein stationärer Zustand einstellt. Die aufbauenden Stufen 2 bis 4 stellen eine neuronale Verstärkungskontrolle (α - und β -Adaptation) dar, sowie die Generierung von Nervenimpulsen im retinalen Level der Ganglienzellen mit Weiterleitung zum optischen Nerv [vgl. BODMANN 1987]. Hierbei ist die Stufe der Sehstoffvariation eine langsame Anpassung und steuert die stationäre Helligkeitswirkung des Umfeldes. Auf die transiente Adaptation, also die Anpassung an unterschiedliche Lichtverhältnisse im Gesichtsfeld, wird in zitierter Arbeit nicht eingegangen. Generell wird zwischen drei Adaptationsverläufen unterschieden, der Dunkeladaptation, der Helladaptation und der chromatischen Adaptation [vgl. STILES 1961; KHANH 2004]. Bei der Dunkeladaptation, gekennzeichnet durch eine Abnahme der auf die Retina einfallenden visuellen Strahlung, findet der Vorgang der Sehstoffkonzentrationserhöhung statt. Befindet sich der Mensch in einem photopischen Adaptationszustand, dauert es bis zu 30 Minuten, um die Stäbchen ihre maximale Empfindlichkeit erreichen zu lassen. KHANH unterteilt den Vorgang in drei Phasen, welche auch in Abbildung 13 verdeutlicht sind. In Phase 1, welche 3-5 Minuten dauert, kontrollieren die Zapfen das Sehen. Ihre Empfindlichkeit erhöht sich und der Schwellenwert der Sichtbarkeit sinkt. Anschließend folgt die zweite Phase. Die Zapfenadaptation ist beendet und der Empfindlichkeitsmaximalwert ist erreicht. Die Stäbchen benötigen noch eine gewisse Zeitspanne, bis diese nach circa 7-10 Minuten beginnen, das Sehen zu übernehmen. Währenddessen befindet sich der visuelle Apparat im Bereich des Kohlrauschplateaus. Phase 3 hat eine erneute Steigerung der Empfindlichkeit zur Folge, was wiederum zur Reduzierung des Schwellenwerts führt. Eine Anpassung der Stäbchen ist nach 30 Minuten beendet. [vgl. GOLDSTEIN 2002]

Die Helladaptation erfolgt invers zur Dunkeladaptation. Der Abbau der Sehstoffkonzentration erfolgt jedoch erheblich schneller. Der Adaptationsprozess dauert 4-5 Minuten, um vom Stäbchensehen zum Zapfensehen überzutreten. Einen Sonderfall stellt die chromatische Adaptation dar, welche am ehesten mit einem automatischen Weißabgleich zu vergleichen ist. Hierbei ändern die Zapfenrezeptoren unabhängig voneinander ihre relative spektrale Empfindlichkeit und stellen sich auf ein Niveau ein, bei welchem es dem Betrachter so erscheint, als seien Lichtspektren unterschiedlicher Farbtemperatur immer noch weiß. Bei kurzwellig dominanten Spektren, beispielsweise Tageslicht, verringert sich der S-Zapfenempfindlichkeitsanteil, wobei dieser bei langwellig dominantem Licht ansteigt und die Empfindlichkeit der L-Zapfen und ggf. M-Zapfen abnimmt. [vgl. KHANH 2004]

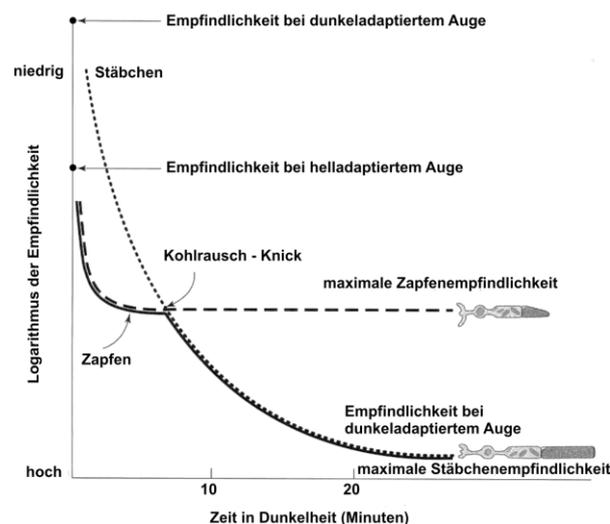


Abbildung 13: Rezeptorbasierte Dunkeladaptationskurven in Abhängigkeit der Adaptationszeit (Kohlrausch-Knick steht für den Anfang des Kohlrauschplateaus) [GOLDSTEIN 2002]

Zusätzlich zu den Adaptationsprozessen kommt es für die effiziente Erreichung des Adaptationsniveaus und damit der Regelung der ins Auge einfallenden Bestrahlungsstärke zum Pupillenreflex. Über den Durchmesser der Pupille wird eine Regelung um den Faktor 16 erfüllt [BERKE 1999]. Dabei ist nicht nur die Bestrahlungsstärke ausschlaggebend, sondern auch in besonderem Maße die spektrale Komposition des Lichts. Betrachtung finden sollte hierbei der skotopische Einfluss durch die Stäbchen [vgl. LEWIS 1999; BERMAN 1987; TREZONA 2000].

Resümierend scheinen die Grundprinzipien der Sehvorgänge, unter der Voraussetzung eines konstanten Zustandes, bekannt zu sein. Insbesondere photopische Reiz-Empfindungsvorgänge lassen sich mit ziemlicher Sicherheit qualitativ gut beschreiben. Für den mesopischen Bereich ist aufgezeigt, dass für die verschiedenen Sehaufgaben variable Zustände vorherrschen und sich, diesen folgend, differenzierte Hypothesen der Beschreibung formulieren lassen. Jene werden auch in Zukunft für wissenschaftliche Kontroversen sorgen. Gesichert ist, dass für eine Beschreibung des mesopischen Sehvorgangs erweiterte rezeptorale Felder in Betracht gezogen werden müssen, welche je nach Aufbau Signale verstärken und abschwächen. Besonders zu berücksichtigen ist eine iterative Signalverarbeitung über Regelungsschleifen. Diese beeinflussen nicht nur retinainterne Aspekte wie die Aktivierung von Sehstoffregelungsprozessen, sondern auch externe, beispielsweise in Form der Pupillen Anpassung. Grundsätzlich ist das visuelle System bestrebt einen stabilen Zustand einzunehmen - ein Adaptationsniveau. Adaptationsprozesse und -zustände sind von besonderer Bedeutung für die Arbeitsweise der Rezeptoren und nachgeschalteten Systeme. Für den Fall der Mesopie, einem Bereich, der durch variable Rezeptorvorgänge gekennzeichnet ist, muss eine Beschreibung der Hellempfindung durch die Aufnahme und Kombination von statischen Adaptationsbedingungen ausgehen.

2.3 Gerontologische Merkmalsveränderungen

Mit dem Alter finden beim Menschen anatomische und psychologische Veränderungen statt. Diese beeinflussen je nach Sehaufgabe deren Erfüllungsqualität. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird prinzipiell auf die wichtigsten anatomischen Veränderungen, das Hellempfinden betreffend, eingegangen. Auf die Beschreibung psychologischer Varianzen wird nicht eingegangen, da diese nur äußerst schwer zu operationalisieren sind. Allgemein betrachtet gehen psychologische Merkmalsveränderungen aus Erfahrungen hervor, welche vor allem im Bereich der Farbmotrik und Farberscheinung eine Rolle spielen. Auch Vorgänge, das Kontrastempfinden, die Refraktionsänderungen und die Sehschärfe abbildend, werden neben der Blendempfindlichkeit nicht behandelt. Vornehmlich sind vergleichende Aussagen zu BERKE & MÜNSCHKE (1996) aufgeführt. Andere verwendete Quellen werden explizit gekennzeichnet.

Von außen nach innen gesehen unterliegt zuerst die Linse altersbedingten Veränderungen. Neben der Alterssichtigkeit (Presbyopie) findet eine Linsentrübung (Katarakt) statt. Beide Defizite sind chemischen und geometrischen Veränderungen des Linsenmaterials geschuldet¹². Mit Alterszunahme kommt es zur Abnahme der Akkommodationsfähigkeit in Form des Verlustes der Fokussierfähigkeit auf nahe Sehobjekte. Während Menschen im 20. Lebensjahr noch auf eine mittlere Sehentfernung von 10 cm fokussieren können, ist diese mit 60 Jahren auf 85 cm gestiegen. Durch die Eintrübung der Linse ist eine wellenlängenabhängige Empfindlichkeit des alternden Auges gegeben. Mit steigendem Alter nimmt der Transmissionsgrad kurzwelliger spektraler Anteile besonders stark ab. Dies wird aus Abbildung 14 deutlich. Insgesamt verringert sich der Transmissionsgrad ab dem 48. Lebensjahr auf etwa 45 % [LERMANN 1980]. Vergleichbare Angaben lassen sich ADRIAN & GIBBONS entnehmen. Jene Autoren beschreiben beispielsweise den Abfall des okularen Transmissionsvermögens eines 80-Jährigen in Bezug auf einen 30-Jährigen auf den Wert von 21 %. Legt man deren Modell zugrunde und bezieht sich nicht auf die Altersreferenz von 30 Jahren, erhält man für die Angabe von LERMANN einen Reduktionswert von 55 %.

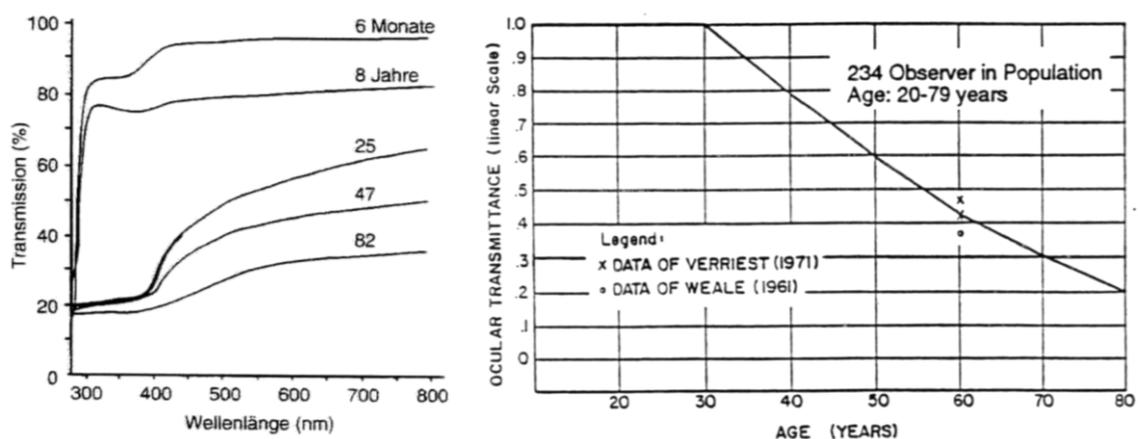


Abbildung 14: Variation der relativen spektralen Transmission des Auges in Abhängigkeit des Alters [links LERMANN 1980; rechts ADRIAN 1994]

Während die Unterschiede der erwachsenen Altersgruppen von $\lambda < 400$ nm marginal sind, differieren die Transmissionseigenschaften hin zu mittleren- und langwelligen Spektren erheblich. Der enorme Verlust an transmissivem kurzwelligem Licht ist durch das Versagen der linseninter-

¹² Haupteffekte sind: Verhärtung des Linsenkerens, Verdickung der Linse durch Bildung neuer Nervenfasern, Proteinklumpungen, Wasseransammlung in den Vakuolen

nen Reparaturmechanismen zu begründen. Der zunehmende Einfluss an UV-Strahlung fördert das Freisetzen von Radikalen und das Sattfinden von Oxidationsprozessen. Während der menschlichen Entwicklung sind zwei Substanzen für diese Entwicklung verantwortlich. Die Verbindungen der 3-Hydroxykynurenine haben ein Absorptionsmaximum bei den Wellenlängen 360 nm und ~470 nm. Der folgende Transmissionsverlust nimmt mit dem Lebensalter stetig zu [vgl. WEALE 1995]. Ein damit einhergehender Verlust an zu verarbeitenden Photonen für die Rezeptoren führt im Alter zu einer geringeren Netzhauthelligkeit, ergo zu einem erhöhten Lichtbedarf bei der Alltagsbewältigung. Gleichen Sachverhalt zeigt eine Untersuchung der spektralen Hellempfindlichkeit nach SAGAWA (2002). Beide photopischen Empfindlichkeitskurven wurden mittels zwei Probandengruppen und anhand der Flickerphotometrie erhoben. Es ist ein deutlicher Unterschied der relativen Hellempfindlichkeit bei Unterschreiten der Wellenlänge von $\lambda=500$ nm ersichtlich (Abbildung 15).

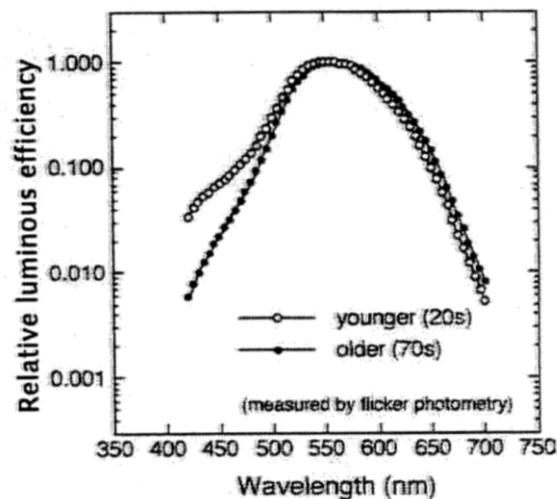


Abbildung 15: Altersabhängige relative spektrale Empfindlichkeitskurven [SAGAWA 2002]

Wie schon im vorherigen Kapitel erläutert, trägt die Pupille erheblich zur Regelung des einfallenden Lichts und der Adaptation bei. Geregelt wird die Größe der Pupille durch die Iris. Diese reguliert unter Variation des Pupillendurchmessers die retinale Beleuchtungsstärke. Mit zunehmendem Alter nimmt die Regulatorfähigkeit jedoch ab und während bei niedrigen Adaptationsleuchtdichten der Pupillendurchmesser von Jüngeren (20-30 Jahren) zwischen 7 und 8 mm liegt, beträgt dieser bei 80-Jährigen nur noch circa 3,5 mm. Dies schränkt den Dynamikumfang zwischen photopischen und skotopischen Bedingungen beachtenswert ein (Abbildung 16) [vgl. BERKE 1996].

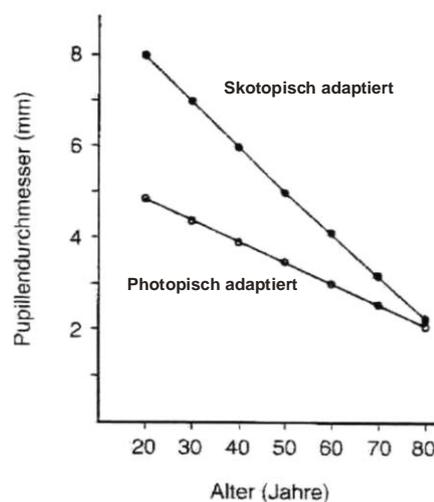


Abbildung 16: Mittlerer Pupillendurchmesser in Abhängigkeit des Alters [mod. BERKE 1996]

Eine direkte Auswirkung ist der veränderte Anteil des zur Retina gelangenden Lichtstromes, welcher sich unter „dunklen“ Bedingungen um ein Drittel bezüglich eines 60- zu 20-Jährigen verringert. Dieses Phänomen wird als senile Miosis bezeichnet und hängt mit der Verhärtung der Iris Muskulatur und dem Verlust der Elastizität des Irisstromas zusammen. Eine Potenzierung erfährt der Verlust des Lichtstroms durch die senile Miosis durch den weiter oben schon genannten Katarakt, da in das Auge einfallendes Licht nunmehr durch die dickste Stelle der Linse dringen muss.

Neben genannten anatomischen Modifikationen beeinträchtigen auch neuronale Veränderungen die Verarbeitung eines Sehreizes und dessen Empfindung im Gehirn. Da das Sehen von der retinalen Struktur, vielmehr von der Rezeptorverteilung und dem Rezeptorvorkommen abhängig ist, sind negative Auswirkungen bei deren Reduktion anzunehmen. Im Verlauf der Alterung nimmt die Zahl der Pigmentepithelzellen im retinalen Pigmentepithel (RPE) ab, wodurch die Versorgung und Erneuerung der Rezeptorzellen eingeschränkt ist. Stoffwechselprodukte können nicht abgebaut werden und verstärkt tritt ein Zufuhrenpass in der Peripherie der Netzhaut auf. Diesbezüglich ist die altersabhängige Makuladegeneration (AMD) zu nennen, bei welcher ein Rezeptorverlust von 10 % (65-Jährige) bzw. 30 % bei über 75-Jährigen zu verzeichnen ist. Pro Lebensjahr gehen mehr als 5000 Fasern des Sehnervs verloren (5600 nach BALAZSI ET AL. 1984). Eine Reduktion der Nervenzellen des LGN erfolgt zwischen dem 20. und 60. Lebensjahr um ein Sechstel. Schätzungen gehen von einer Abnahme der Nervenzellen im Sehapparat aus, welche zwischen 2,5-3 % liegt. In Abbildung 17 ist die Abnahme der Rezeptorzellen und der Ganglienzellen, welche die Aufgabe der Verschaltung und Weiterleitung der Informationen haben, dargestellt. [vgl. GAO 1993]

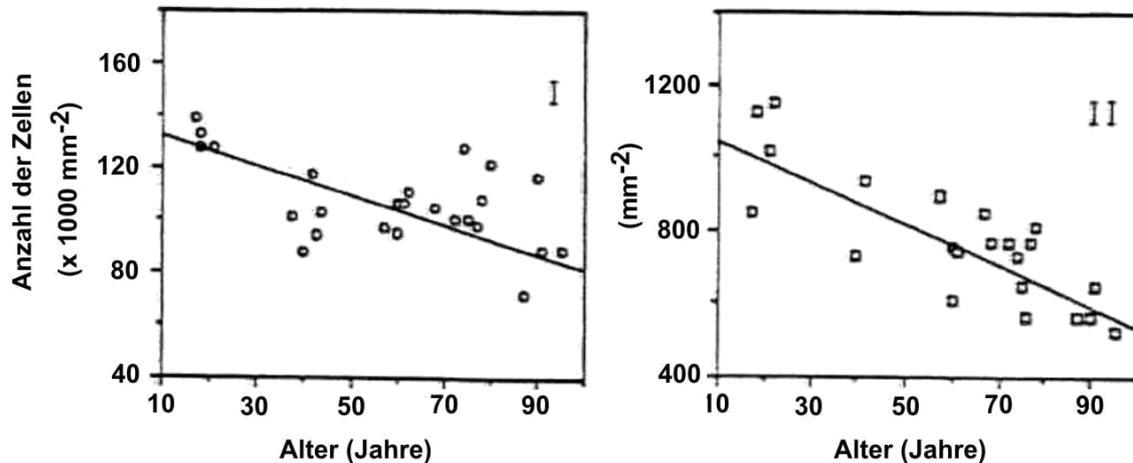


Abbildung 17: Abnahme der Stäbchen in der Netzhautperipherie (I) und der Zellen im LGN (II) [GAO 1993]

Weiterhin wird das Gesichtsfeld von der Peripherie her immer weiter eingeschränkt, wovon die Photonenabsorptionswahrscheinlichkeit und somit der Sehvorgang im Allgemeinen betroffen sind [vgl. SCHIEBER 1995]. Die folgende Abbildung visualisiert die Einschränkung des Gesichtsfeldes eines Auges in horizontaler und vertikaler Ausdehnung.

Neben einer Vielzahl von vergleichbaren wissenschaftlichen Studien wurde auch durch RICHARD ET AL. die Wirkung des Alters auf die Adaptationszeit mittels Schwellenkontrastmethode betrachtet. Das Team untersuchte 240 Probanden zwischen 16 und 89 Jahren. Als Ergebnis lässt sich eine hohe Abhängigkeit der Dunkeladaptationszeit vom Alter festhalten, welche in Abbildung 19 dargestellt ist. Erkennbar ist zudem, dass mit zunehmendem Eintreten der gerontologischen Veränderungen die Fähigkeit zur Adaptation auf sehr dunkle Zustände schwindet.

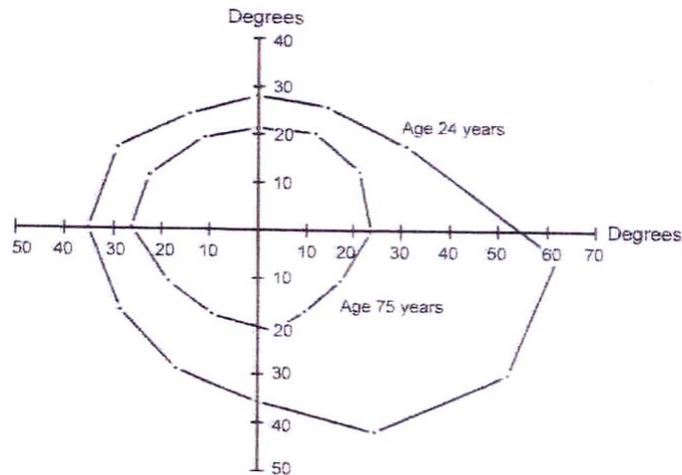


Abbildung 18: Altersabhängige Ausdehnung des Gesichtsfeldes (monokular) [WILLIAMS 1983]

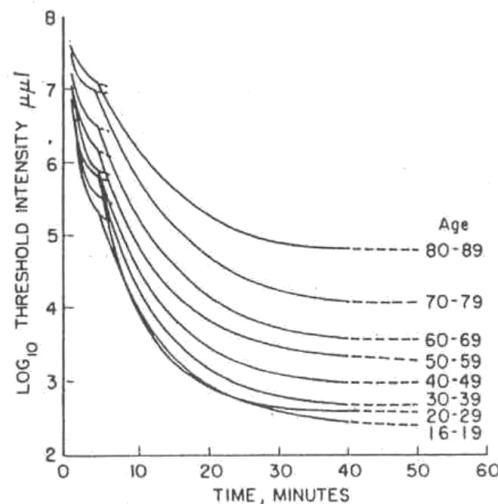


Abbildung 19: Dunkeladaptation als Funktion des Alters [RICHARD 1961]

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle neben den räumlich-anatomischen Auswirkungen auch auf zeitliche Aspekte der altersabhängigen Entwicklung eingegangen werden. Mit Betrachtung der derzeit gültigen spektralen Empfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ wird offensichtlich, dass diese unter Probandenversuchen einer jungen Probandengruppe gewonnen wurde und streng genommen nur deren Empfindlichkeit wiedergibt. Als Versuchsmethode bediente man sich der Flimmerphotometrie (Kap. 3.5). Welche Auswirkung eine zeitlich basierte Abgleichmethode unter gerontologischen Aspekten hat, soll im Folgenden aufgezeigt werden. Grundsätzlich bildet die Latenzzeit, jene Zeit, die von der Auslösung des Reizes bis zu dessen Wahrnehmung vergeht, die Grundlage der Einstellbarkeit von zeitlich varianten Signalen. Zum einen hängt die Latenzzeit von der Strahldichte des Reizes ab, welche ausreichen muss, um einen Reiz in ein elektrisches Signal innerhalb der Netzhaut umzuwandeln. Welchen Restriktionen dies gegenüber jungen Menschen unterworfen ist, wurde im Verlauf dieses Kapitels aufgezeigt. Zum anderen ist die Latenzzeit selbst altersabhängigen Veränderungen unterworfen. Bereits im 5. Lebensjahrzehnt kann die Latenzzeit um ein Drittel höher sein als noch in der 3. Dekade. Laut KNOLL (2005) wurde unter photopischen Bedingungen ($L=270 \text{ cd/m}^2$), einem Sehwinkel von $1,2^\circ$ und mittels 20 Probanden (23-46 Jahre) eine mittlere Flimmerverschmelzungsfrequenz von 40 Hz ermittelt. Die Veränderung im Alter wird mit der Verminderung von 1 Hz je Dekade angegeben. Eine Ausprägung der spektralen Empfindlichkeitsfunktion in Abhängigkeit aller in Frage kommender gerontologischer Merkmalsveränderungen ist vergleichend Abbildung 15 zu entnehmen.

Um die Auswirkungen der Wandlung mit dem Alter bezüglich des Hellempfindens aufzuzeigen, berechnete SCHIERZ (2008) altersbasierte, photopische Schwächungsfaktoren der visuellen Hellempfindung einzelner Spektren nach Gleichung 1.

$$w_{vis,age} = k_{25} \cdot \frac{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot \frac{\tau_{age}}{\tau_{vis}} \cdot V^*(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} S_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (Gl.1)$$

In der Berechnung stehen k_{25} für einen Normierungsfaktor, der $w_{vis,age}$ für einen 25-Jährigen auf 1 setzt. $S(\lambda)$ kennzeichnet die zu bewertende Strahlung im Wellenlängenbereich von 380-780 nm und wird mit einem Faktor der altersabhängigen Transmission $\tau_{age}/\tau_{vis=33\text{Jahre}}$ sowie einer spektralen Hellempfindlichkeitskurve (hier $V^*(\lambda)$) für 33-jährige [SHARPE ET AL. 2005]) multipliziert. Im Nenner finden sich die gebräuchliche Berechnung des Produktes der Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ und der zu bewertenden Strahlung. SCHIERZ verweist auf die Defizite der 1924 beschriebenen $V(\lambda)$ -Funktion im kurzwelligen Bereich und ersetzt diese im Zähler durch eine angepasste Funktion. Weiterhin wird vorgeschlagen, auf eine vollständige Implementierung von $V^*(\lambda)$ auch im Nenner zu verzichten, da $V(\lambda)$ immer noch in der Photometrie Anwendung findet. In Abbildung 20 wird an zwei auch in vorliegender Forschungsarbeit untersuchten Spektren die altersabhängige Wirkung auf das Hellempfinden präsentiert. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich um photopische Bewertungen handelt, welche anhand von Berechnungen erstellt wurden. Wahrnehmungspsychologische Effekte etc. wurden nicht berücksichtigt. Es handelt sich somit um eine sehr starke Vereinfachung und bedarf der empirischen Verifikation.

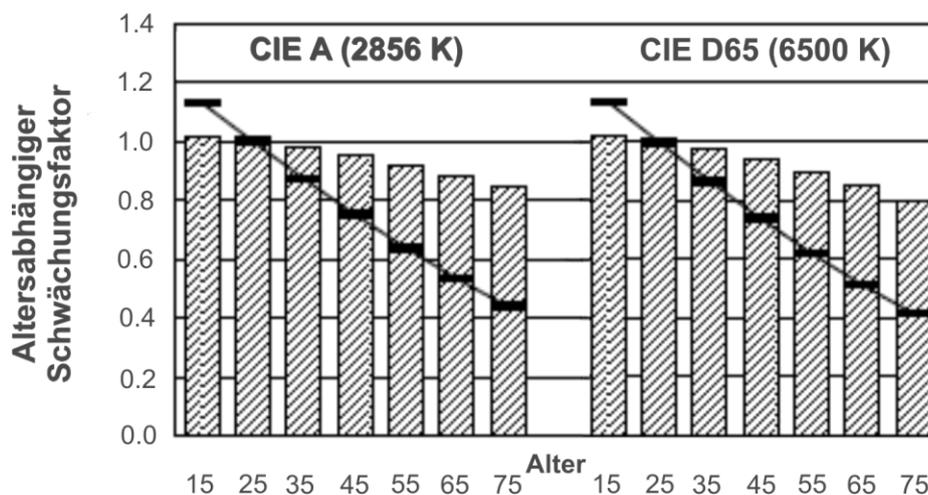


Abbildung 20: Altersabhängige Schwächungsfaktoren für Normlichtart A und D65 bezüglich des Hellempfindens unter photopischen Bedingungen (berechnet nach Gl. 1; schraffierte Balken: Schwächungsfaktor ohne altersbedingte Pupillenverengung; Horizontale Striche: mit altersbedingter Pupillenveränderung) [mod. SCHIERZ 2008]

Aus der Summe der genannten Aspekte ist zu extrahieren, dass im Verlauf des menschlichen Lebens unser visuelles System einer stetigen Modifikation unterworfen ist. Die vorliegende demographische Entwicklung und die gesteigerten Ansprüche einer älteren Gesellschaft an die Mobilität, auch im Anwendungsbereich der Mesopie, verlangen eine Einbeziehung älterer Probanden in wahrnehmungspsychologische Forschungsarbeiten, um allgemeingültige Aussagen treffen zu können. Besonders bei der Betrachtung breitbandiger spektraler Anwendungen können Unterschiede in der Wahrnehmung auftreten. Diese gilt es aufzuzeigen und ggf. mit dynamischen oder zielgruppenorientierten Systemapplikationen zu nivellieren.

2.4 Assoziierte wahrnehmungspsychologische Effekte zur Hellempfindung

In Kapitel 2.2 wurde auf Prinzipien des Sehvorgangs eingegangen, welche in Abbildung 11 mit Verarbeitungs- und Weiterleitungsprinzipien für das mesopischen Sehen detailliert wurden. Kennzeichnend ist die stimulansabhängige Interaktion von Stäbchen und Zapfen sowie deren Beitrag zum Hellempfinden. Insbesondere durch die Partizipation des zapfenbestimmten chromatischen Luminanzkanals treten wahrnehmungspsychologische Effekte auf, welche Prinzipien der Additivität (Kapitel 3.2) vermissen lassen. Auf die wichtigsten Effekte einer mesopisch bedingten Hellempfindung soll folgend eingegangen werden.

Purkinje-Effekt

Den wohl wichtigsten Effekt in der Beschreibung von mesopischen Größen stellt der Purkinje-Effekt dar. Bereits 1825 veröffentlichte JAN EVANGELISTA PURKINJE „Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne – 2. Bändchen“, in welchem er subjektive Feststellungen zur Helligkeitswirkung von Farben unter Variation des Leuchtdichteadaptationsniveaus beschrieb.

„[...] Objectiv hat der Grad der Beleuchtung grossen Einfluss auf die Intensität der Farbenqualität. Um sich davon recht lebendig zu überzeugen, nehme man vor Anbruch des Tages, wo es eben noch schwach zu dämmern beginnt, die Farben vor sich. Anfangs sieht man nur schwarz und grau. Gerade die lebhaftesten Farben, das Roth und das Grün, erscheinen am schwärzesten. Das Gelb kann man vom Rosenroth lange nicht unterschieden. Das Blau war mir zuerst bemerkbar. Die rothen Nüancen, die sonst beim Tageslicht am hellsten brennen, nämlich carmin, zinnober und orange zeigen sich lange am dunkelsten, durchaus nicht im Verhältnis ihrer mittleren Helligkeit. [...]“ [PURKINJE 1825]

Anders formuliert nimmt mit abnehmendem Adaptationsniveau die Hellempfindung von kurzwelligem Spektralanteilen des Lichts zu. Während „rote“ Strahlung unter photopischen Bedingungen heller wirkt als „blaue“, ist dies unter skotopischen Bedingungen für gleiche Strahlungskompositionen invers. Verantwortlich hierfür ist der Übergang vom Zapfenmechanismus zum Stäbchenmechanismus und die damit verbundenen maximalen spektralen Empfindlichkeiten. Es erfolgt ein fortlaufender Prozess, welcher nur für ein jeweiliges Adaptationsniveau als konstant angesehen werden kann. Demzufolge wird oftmals von einem „Purkinje-Shift“ gesprochen. Mit kontinuierlich abnehmendem Helligkeitsniveau unterliegen die Zapfen einem Deaktivationsprozess und die relativen Beiträge der Stäbchen wachsen in Bezug auf die Zapfen an.

KHANH (2004) bezeichnet in seinen Ausführungen den Purkinje-Effekt als eine Art „Ausdruck für die Dominanz der Stäbchen gegenüber der Zapfen in einem bestimmten Bereich des Adaptationsniveaus“. Er kommt zu dem Schluss, dass es im mesopischen Wirkungsbereich nicht nur zu einer Zapfen-Zapfen-Wechselwirkung kommt, sondern außerdem eine Interaktion zwischen Stäbchen und Zapfen erfolgt. Gekennzeichnet sind diese Prozesse durch eine hinreichende Anzahl psychophysisch-physiologischer Auswirkungen und im Besonderen durch ein nichtlineares Reiz-Empfindungsverhalten die Hellempfindung betreffend.

Möglicherweise kann der Gedanke gefolgert werden, dass es sich bei den genannten Wechselwirkungsmechanismen (Dominanz) auch um konkurrierende Auslastungen von Signalwegen durch den visuellen Apparat handelt. Bei entsprechend niedrigen mesopischen Adaptationsniveaus ist es möglich, dass durch Zapfen vermittelte chromatische Signale komplett durch einen Stäbcheninput unterdrückt werden können. [vgl. SPILLMANN ET AL. 1972]

Generell teilt KHANH die Ansicht, dass jene schon in Kapitel 2.1 aufgezeigten Variablen zu beachten sind, wenn es um die Einschätzung einer Hellempfindung geht. Die Wechselwirkungen sind insbesondere beeinflussbar durch das Adaptationsniveau, die spektrale Zusammensetzung des Sehreizes und den Ort der Strahlungsstimulation auf der Netzhaut. Schon KOHLRAUSCH (1923) fasste das Auftreten der „PURKINJE-Erscheinung“ folgendermaßen zusammen.

Gesichtsfeldgröße	Leuchtdichte		Erscheinung
3° bis 5° Durchmesser oder mehr im zentralen Netzhautbezirk	Von 10 asb an aufwärts	3,18 cd/m ²	Reines Tagsehen
	Zwischen 10 und 1/100 asb	3,18-0,00318 cd/m ²	Übergang vom Tages- zum Dämmerungssehen
	Unterhalb 1/100 asb	<0,00318 cd/m ²	Reines Dämmerungssehen
Gesichtsfeld kleiner als 1,5° Durchmesser (fovea centralis)	beliebig	-	Reines Tagsehen, Purkinje-Erscheinung fehlt

Tabelle 2: Eingrenzung des Auftretens des Purkinje-Effekts (asb: Apostlib) [entnommen und modifiziert JAINSKI 1938]

Helmholz-Kohlrausch-Effekt

Dieser Effekt beschreibt ein im Zapfensystem auftretendes Phänomen. Oft wird in der älteren Literatur vom Eindruck der Farbenglut gesprochen. Eine detaillierte Beschreibung findet sich bei WYSZECKI & STILES (1982) und INGLING (1977).

Die Hellempfindung stellt sich über einen chromatischen Anteil des Zapfensystems und den zugehörigen Beitrag des achromatischen Luminanzkanals ein (vgl. Abbildung 11). In der Wirkung lässt sich der Effekt so beschreiben, dass bei konstant gehaltener Leuchtdichte die wahrgenommene Helligkeit eines Stimulus mit dessen zunehmender Sättigung ansteigt. Dabei ist die Stärke des Effekts keinesfalls für jeden Farbton konstant. Vor allem bei Vergleichen von Stimuli hinsichtlich der Hellempfindung ist der HELMHOLZ-KOHLRAUSCH-Effekt von Bedeutung. Insbesondere bei der Anwendung des heterochromatischen Direktabgleichs und der Aufgabe, zwei unterschiedliche Lichtfarben oder farbige Stimuli auf gleiche Helligkeit abzugleichen, wird die eingestellte und messbare Leuchtdichte beider Felder differieren, obwohl für den Probanden gleiche Hellempfindungen auf beiden Seiten vorliegen. Eine Verringerung des Effekts findet statt, indem für Untersuchungen der Hellempfindung beispielsweise nur entsättigte, „weiße“ Stimuli verglichen werden.

Stiles-Crawford-Effekt

Für die Hellempfindung ist der Durchtrittsort des abbildenden Strahlenbündels durch die Pupille entscheidend. Lichtstrahlen, welche durch die Randbereiche der Pupille treten und nasal sowie temporal auf die Netzhaut treffen, erzeugen ein geringeres Hellempfinden als pupillenmittennahe Eintritte. Der STILES-CRAWFORD-Effekt 1. Ordnung ist ausschließlich an die Zapfen gekoppelt und kann durch eine Gaußfunktion beschrieben werden, wobei Variablen des Richtungsfaktors für den jeweiligen Zapfentyp in Abhängigkeit der Wellenlänge des Lichts und der Abstand des Eintrittsorts zur Pupillenmitte eingehen. [vgl. METHLING 1996; SNYDER 1973]

Zapfen kennzeichnet im Vergleich zu den umgebenden Strukturen eine hohe Brechzahl und sie wirken daher wie Lichtleiter. Bei kleineren Einfallswinkeln, bezogen auf die Zapfenlängsachse, steigt die Größe des Winkels, unter dem das Licht auf die Grenzflächen der Rezeptoren trifft.

Die Wahrscheinlichkeit der Totalreflexion steigt und die Photonen bleiben länger im Rezeptor, was die Absorptionswahrscheinlichkeit eines Photons erhöht. Stäbchen sind vom Vorhandensein des STILES-CRAWFORD-Effekts ausgeschlossen. [vgl. BERKE 1999]

Da der genannte Effekt 2. Ordnung eine Abhängigkeit der Farbempfindung vom Durchtrittsort des Lichtstrahls durch die Pupille beschreibt, wird auf eine Erläuterung verzichtet.

Laterale Inhibition

In einigen Untersuchungsmethoden zur Hellempfindung wird die Präsentation von aneinander grenzenden oder durch eine Trennkante voneinander separierten Stimuli genutzt (z. B. Heterochromatischer Direktabgleich). Speziell in den Untersuchungsbereichen des Helligkeits- oder Farbkontrasts, stellt sich das Wissen um die Laterale Inhibition als wichtig dar. Oftmals ist das Hellempfinden eines Stimulus von dem Wirken eines benachbarten Sehobjekts stärker abhängig als von der eigenen Helligkeit. In Kapitel 2.1 wurde auf die diffizile Struktur der Netzhaut eingegangen. Diese fand später Überführung in die hochkomplexe Verschaltung innerhalb des visuellen Systems. Es kommt insbesondere dann zum Effekt der seitlichen Hemmung, wenn horizontale Verschaltungsprinzipien in neuronalen Systemwegen präsent sind (Horizontalzellen, Ganglienzellen). Grundsätzlich hemmen beteiligte Neuronen immer die räumlich benachbarten Neuronen. Die laterale Inhibition stellt sich als räumlich zweidimensional dar (Herausbildung von perzeptiven Feldern) sowie als zweischichtiger Netzwerkprozess. Ein Neuron aus der ersten Schicht regt ein oder mehrere korrespondierende Neuronen der nächsten Schicht an, hemmt aber zugleich die seitlich benachbarten Neuronen zur eigenen Stimulationsrichtung. [vgl. PALMER 2002]

Dies lässt sich anhand der Vorstellung zweier benachbarter Flächen verdeutlichen, von denen eine „hell“ und die andere „dunkel“ erscheint (z. B. die hellere Fläche weist die doppelte Leuchtdichte der dunkleren Fläche auf), kommt es an der Trennkante zu dem eben beschriebenen Effekt. Erfolgt eine Beurteilung beider Flächen durch den Menschen, ergibt sich ein Überschwingen des eigentlichen Reizes auf der hellen Seite und ein Unterschwingen auf der Anderen. Der Effekt einer Hellempfindung bei unterschiedlichen Leuchtdichten (o. g. Faktor 2) wird durch den genannten Zusammenhang nichtlinear verstärkt. Ein Beispiel dafür bilden die MACHSCHEN Streifen.

Essenziell stellt sich die Beachtung der Auswirkungen der lateralen Inhibition bei Untersuchungen zum Hellempfinden mittels Direktvergleich an einer Trennkante dar. Mit dem Abgleich beider Stimuli auf das Kriterium „gleich hell“ an der Kante, kommt es hierbei unweigerlich zu exzitatorischen und inhibitorischen Effekten. Das dargestellte Phänomen lässt sich gut unter Zuhilfenahme des HERMANN-Gitters beobachten und es ist erkennbar, dass zwischen den Gitterstrukturen auf der eigentlich weißen Fläche graue Kreise entstehen, welche messtechnisch nicht erfassbar sind.

2.5 Beschreibung der Hellempfindung

Eine grundsätzliche Aufgabe der Photometrie sollte es sein, die empfindungsbasierte Wahrnehmung mit messbaren Größen zu unterlegen und diese in eine berechenbare Metrik zu überführen. In der wissenschaftlichen Disziplin der Photometrie besteht jedoch das fundamentale Problem, dass sich die menschliche Wahrnehmung als ein kognitiver Prozess darstellt, der durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet ist (Kapitel 2.1-2.4). Quantitative physikalische Messungen stellen eine Basis dar, müssen jedoch für wahrnehmungsbeschreibende Aspekte noch gefunden werden. [vgl. SCHANDA 1998; KOKOSCHKA 2003]

Ein Eindruck, wie Reize im visuellen System des Menschen verarbeitet werden und zu einer Empfindungsentstehung führen, ist im Prinzip bekannt. Beim Lichteinfall werden die Rezeptoren angeregt. In deren Folge werden elektrische Signale als Produkt der photochemischen Reaktion generiert und über Verschaltungsmechanismen innerhalb der Netzhaut in einen Helligkeitskanal (Luminanz) und Farbkanal (Chrominanz) überführt.

Bereits im 19. Jahrhundert wurde durch verschiedene Forscher festgestellt, dass die Hellempfindung einer starken spektralen Abhängigkeit folgt. MAXWELL¹³ wies zu dieser Zeit erstmals nach, dass Farb- und Hellempfinden nicht identisch sind. Die Komplexität des Sehprozesses zeigt, wie schwierig es ist, die visuelle Wahrnehmung zu untersuchen und in photometrische Maße zu überführen. In gewisser Weise hat die sich Wissenschaft heute mit den gleichen Problemen auseinander zu setzen, wie vor einem Jahrhundert. Der Erkenntnisstand ist, insbesondere im Mesopischen, weltweit noch am Anfang [vgl. HAMM 1997; KHANH 2004; KOKOSCHKA 2003].

Derzeit wird im Bereich der Lichttechnik die Leuchtdichte als bestkorrelierendes Maß zur Beschreibung der Helligkeit, also der Hellempfindung, genutzt [vgl. VÖLKER 2006]. Da die, der Leuchtdichte zugrundeliegende, spektrale Empfindlichkeitsfunktion (1924) nur unter bestimmten Sehbedingungen Gültigkeit besitzt (Kap. 3.1), ist die Beschreibungsfähigkeit der photometrischen Größe bezüglich der Hellempfindung stark eingeschränkt. Dies ist einmal mehr vor dem Hintergrund herauszuheben, dass die unter der Methode der Flickerphotometrie gewonnene photopische spektrale Empfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ nur den achromatischen Anteil der Hellempfindung zu erfassen vermag [vgl. KHANH 2004]. SCHANDA (1998) fasst zusammen, dass die Leuchtdichte keinen akkuraten Deskriptor für die Helligkeit darstellt, da deren Relationen zueinander nichtlinear und insbesondere beim mesopischen Sehen von Nichtadditivität geprägt ist. Eine psychophysikalische Größe, welche gut mit der Hellempfindung korreliert, stellt die äquivalente Leuchtdichte dar (Kap. 3.4).

Zur Berechnung der Helligkeit bestehen seit langem verschiedene Ansätze. Der wohl Bekannteste ist von FECHNER 1866, der eine Proportionalität zwischen Helligkeit und der Anzahl der Unterschiedsschwellen innerhalb der Objektleuchtdichte und der Umfeldleuchtdichte voraussetzt. Ein Kritikpunkt ergibt sich dadurch, dass die Einschätzung der Helligkeit zwischen zwei Leuchtdichten nicht über einen konstanten Schwellenkontrast eingeschätzt werden kann. Ein beschriebener logarithmischer Zusammenhang zwischen Helligkeit und Leuchtdichte kann nur für Stimuli gegeben sein, welche sich nicht zu stark von der Adaptationsleuchtdichte unterscheiden. Nur in diesem Bereich folgt der Übergang der Proportionalität zwischen beiden Attributen (Fechner-Gebiet). Einen differenzierten Ansatz bildet das Modell nach STERN (1950), der einen Potenzansatz dem logarithmischen Zusammenhang vorzog. STERN geht von zwei, die Wahrnehmungssituation beschreibenden, Konstanten aus. Die Berücksichtigung der Empfindung Schwarz wird durch die Verwendung der Subtraktion der Schwarzleuchtdichte (bewirkt gerade die Empfindung Schwarz) von der Objektleuchtdichte gewährleistet. Der einfache Ansatz einer Quantisierung für Helligkeiten selbstleuchtender Flächen entstand bereits 1922 durch ADAMS & COBB. Berücksichtigt sind höherretinale Prozesse der Ganglienzellen, soweit schon damals bekannt, die sich in einem Modell der Pulserzeugung darstellen lassen. Ausgangspunkt ist die Periodendauer zwischen zwei Nervenimpulsen als Addition der Latenz einer Antwortzeit, ermittelt aus einer Konstante für die die Frequenzempfindlichkeit bestimmende Leuchtdichte

¹³ 1860: Maxwell, J. C. On the theory of compound colours, and the relation of the colours of the spectrum. In: Color Research and Application. Vol. 18/4. (1993). pp. 272-287.

(vergleichbar mit dem Effekt der Adaptationsleuchtdichte) und die Sehobjektleuchtdichte. [vgl. KOKOSCHKA 2003]

Neben den aufgeführten unterschiedlichen Ansichten existiert eine Menge weiterer Ansätze, die sich durch die getroffenen Prämissen und Variablen der Forschungsarbeit unterscheiden. Beispielweise favorisieren BODMANN ET AL. (1980) ein potenzbehaftetes Modell, das die sehobjektbasierten Winkelgrößen der Objekt- und Umfeldleuchtdichte berücksichtigt und somit eine Beschreibung der Hellempfindung eines Objektes im homogenen Umfeld angibt. Zusätzlich sei der interessierte Leser auf die CIE 78-1988 und GALL (1983) verwiesen.

Ein Großteil der bestehenden Annahmen und Beschreibungen zur Hellempfindung betrachtet vorzugsweise die Effekte des achromatischen Kanals, differiert in den Untersuchungsmethoden und –variablen, trifft vereinfachende Annahmen und ist allein photopisch bestimmt. Da es Ziel dieser Arbeit ist, sich mit der Hellempfindung im mesopischen Anwendungsbereich auseinander zu setzen, wird folgend eher auf eine qualitative Beschreibung des Hellempfindens eingegangen.

Fest steht, dass die Hellempfindung zu den essentiellen Funktionen der visuellen Wahrnehmung gehört, wenn nicht gar als die ursprünglichste bezeichnet werden sollte. Unabhängig von der Kontrast-, Farb- und Formempfindung bestimmt das Hellempfinden die Attribute dessen, was der Mensch sieht und bildet die Grundlage für weitere Sehfunktionen. [vgl. KOKOSCHKA 2003, KÖHLER 2008; VÖLKER 2006]

Das Hellempfinden wird beschrieben als:

- ein subjektives Maß für die Menge an wahrgenommenem Licht, wobei bei farbigen Objekten zwischen Farbigkeit und Buntheit¹⁴ unterschieden werden muss,
- eine eindimensionale Größe mit dem Nullpunkt der „Schwarzempfindung“¹⁵ und dem Maximalpunkt, der eine Blendung ausschließen soll. [KOKOSCHKA 2003; VÖLKER 2006]

Nach KÖHLER (2008) ist festzuhalten, dass die Hellempfindung im Bereich der Zapfenaktivität hauptsächlich von der Leuchtdichte (achromatische Rezeptorsignalanteile) abhängt und von einer „nicht eindeutig“ bestimmbaren Chromakomponente beeinflusst wird.

Das Genannte zusammengefasst, ist für eine Definition der Hellempfindung anzugeben, dass sie eine empfindungsgemäße Größe ist, welche sich je nach Leuchtdichteadaptationsniveau aus den Interaktionssignalen der beteiligten Rezeptoren und –areale zusammensetzt. Die Ankerpunkte für eine Hellempfindungsskala sollten eine Blendung ausschließen und als untere Grenze ein empfindungsgemäßes „Schwarz“ einnehmen. Eine Hellempfindung ist charakterisiert als Empfindung zu einem bestimmten Zeitpunkt, welche keiner zeitlichen Veränderung unterworfen ist. Sie unterliegt starken interindividuellen Schwankungen.

¹⁴ In der Literatur wird oft zwischen Lightness (Oberflächenhelligkeit, Helligkeit, die ein Objekt aufgrund seiner Färbung hat) und Brightness unterschieden. [vgl. SCHIERZ 2007, PALMER 2002]

¹⁵ Eine Empfindung, die nicht gleichbedeutend mit einem lichtlosen Zustand ist, jedoch eine Unterscheidung von Leuchtdichten unterhalb der Schwarzleuchtdichte nicht möglich macht. Angegeben wird die Schwelle zur Schwarzempfindung mit etwa dem 50sten-200sten Teil der Sehobjektleuchtdichte zur Umfeldleuchtdichte. [KOKOSCHKA 2003]

KAPITEL 3

PHOTOMETRISCHE BASIS UND BESCHREIBUNG DER HELLEMPFINDUNG

Die Basis zur Beschreibung der Hellempfindung des Menschen stellt die Photometrie dar. Diese wissenschaftliche Disziplin ist das Bindeglied zwischen der Radiometrie und der Beschreibung empfindungsbasierter Effekte und begrenzt den Gültigkeitsbereich auf sichtbare Anteile des elektromagnetischen Spektrums. Kapitel 3 gibt aufbauend auf vorangegangenen Ausführungen die Dreiteilung der visuellen Helligkeitsbereiche in Form von spektralen Empfindlichkeitsfunktionen wieder. Speziell werden die photopische und skotopische Hellempfindlichkeit erläutert und diskutiert. Durch die Existenz dieser Grenzbereiche fällt es leichter, den mesopischen Bereich zu isolieren und für Forschungsarbeiten zu definieren. Das photometrische System, ergo auch die Größendarstellung einer Hellempfindung, beruht auf der Festlegung der SI-Basiseinheit¹⁶ *Candela*, welche das Maß für die Lichtstärke darstellt. Es ist also unumgänglich auf die Grundlagen und internationalen Festlegungen einzugehen, diese zu diskutieren und auf Problemstellungen in der Anwendung bezüglich einer mesopischen Bewertung zu reagieren. Nicht zuletzt muss die Betrachtung standardisierter Größen auch erfolgen, um eine Vergleichbarkeitsgrundlage mit anderen Studienergebnissen zu erhalten.

Des Weiteren ist es notwendig, die empfindungsbasierte Helligkeit zu operationalisieren und mittels quantitativer Maßzahlen in eine valide Größe zu transformieren. Da die Reizantwort eine Empfindung darstellt, ist diese über psychophysikalische Untersuchungen zu eruieren. Das Prinzip der äquivalenten Leuchtdichte als berechenbare Größe wird ausgeführt und soll als Grundstein für eine spätere Ergebnisbewertung innerhalb dieser Arbeit dienen. Für die Datenerhebung existieren unterschiedlichste Forschungsmethoden. Eine kurze Einführung verschafft einen Überblick und verhilft zu einer kritischen Betrachtungsweise über deren Verwendbarkeit bei wissenschaftlichen Untersuchungen. Zielsetzung dieses Abschnitts ist es, einen Brückenschlag zwischen der Anatomie des Auges und deren Signalverarbeitung zu der Hellempfindungsevaluation sowie deren messtechnischer Beschreibung zu unternehmen. Es werden Grundlagen zum Verständnis der in Kapitel 4 aufgeführten ergänzenden Hellempfindlichkeitsfunktionen und mesopischen Modelle vorgestellt. Anschließend erfolgt die Abgrenzung der zu untersuchenden Forschungsvariablen.

¹⁶ SI: *Système international d'unités* ; Internationales Einheitensystem

3.1 Grenzbereiche der spektralen Empfindlichkeit

In den vorangegangenen Kapiteln wurde auf anatomische Besonderheiten der Reiz-Empfindungs-Verarbeitung zweier statischer Endbereiche des menschlichen Sehens eingegangen. Der photopische Zustand ist zapfenbasiert, der skotopische dagegen stäbchenorientiert. Im Folgenden soll auf die genannten Wahrnehmungsbereiche detailliert eingegangen werden. Beide Zustände werden mit sogenannten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen (Hellempfindlichkeitsfunktionen) beschrieben und bilden die Transformation radiometrischer Daten zu wahrnehmungsorientierten Größen ab. Damit ist der Übergang zu einer wahrnehmungsgerechten Charakterisierung von Lichtquellen und Beleuchtungssituationen geschaffen. Inwiefern diese Charakterisierung einem 1:1 Abbild der menschlichen Empfindung entspricht, steht schon seit Jahrzehnten in der Kritik und wird im Folgenden diskutiert. Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie eine empfindungsbasierte Funktion, gleich welchem visuellen Zustand entsprechend oder welchem Rezeptorkonstrukt zugehörend, entsteht.

Generelles Prinzip ist die Messung relativer Schwellen unterschiedlicher Wellenlängen. Hierbei werden dem Probanden verschiedene, jedoch meist zwei, Teststimuli dargeboten, welche auf subjektive Gleichheit, in diesem Fall hinsichtlich des Attributs gleiche Hellempfindung, eingestellt werden. Wenn dies für alle Wellenlängen geschehen ist, erhält man eine Kurve der relativen Schwelle in Abhängigkeit zur Wellenlänge. Invertiert man die erhaltenen Schwellen, resultiert daraus die Empfindlichkeit in Abhängigkeit der spektralen Wellenlänge – eine spektrale Empfindlichkeitsfunktion. Je nach Anwendung von psychophysikalischen Methoden können diese jedoch unter gleichen Randbedingungen differieren. [vgl. GOLDSTEIN 2002]

Photopische $V(\lambda)$ -Funktion

Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden, speziell in den USA, Untersuchungen zur „relative visibility function“ durchgeführt. Diese unterscheiden sich vor allem in der Nutzung von Testmethoden, Wellenlängenbereichen, Gesichtsfeldern und Adaptationsniveaus.

Erste Erwähnung fand die $V(\lambda)$ -Funktion 1924 und wurde 1926 für den generellen provisorischen Einsatz veröffentlicht [CIE 1926]. Die ursprünglichen Werte jener photometrischen Empfindlichkeitsfunktion gehen auf Angaben von GIBSON & TYNDALL (1923) zurück und beziehen sich auf die Zielsetzung, eigene Messungen unter Zuhilfenahme des Kleinstufenverfahrens mit Untersuchungen anderer Forscher zu vergleichen. Die vorgestellte Kurve symbolisierte eine Revision der eigentlichen I.E.S-Kurve¹⁷. VIIKARI ET AL. (2005) geben eine exzellente Zusammenfassung über die Entstehungsgeschichte der $V(\lambda)$ -Funktion und deren Schwierigkeiten in der Bestimmung und Nutzung. Auf diese Zusammenfassung zurückgreifend sind in Tabelle 3 die Untersuchungsparameter zusammengetragen. Durch ein intensives Studium der detaillierten Daten getätigter Experimente, wird klar, dass speziell die Werte der Empfindlichkeiten an den kurzwelligen und langwelligen Enden der von GIBSON & TYNDALL (auch bei IVES 1912A) empfohlenen Empfindlichkeitsfunktion extrapolierte Daten wiedergeben. Den kompletten Spektralbereich des sichtbaren Lichts (hier 400-770 nm) decken sogar nur drei der für die $V(\lambda)$ Funktion zugrunde gelegten Untersuchungen ab.

¹⁷ I.E.S. – Illuminating Engineering Society

Autor	Methode	Okularer Schlitz	Feldgröße	Retinale Beleuchtungsstärke	Leuchtdichte	λ -Bereich	VP	Alter in Jahren
IVES (1912e)	Flimmerverfahren	0,5x2mm	2°	95Td	2,095cd/m ²	481-655nm	18	18-40
NUTTING (1914)	Flimmerverfahren	0,57x2,57mm	2°	163Td	3,66cd/m ²	490-640nm	16	
						400-700nm	5	
COBLENTZ & EMERSON (1918)	Flimmerverfahren	0,52x2,63mm	2°	22Td	0,47cd/m ²	490-690nm	105	19-59
				7Td	0,146cd/m ²	435-490nm	20	Ø 29
				7Td	0,146cd/m ²	690-750nm		
HYDE, FORSYTHE & CADY (1918)	Kleinstufenverfahren	künstliche Pupille 0,6mm ²	7°	29Td	0,705cd/m ²	560nm	29	
				6Td	0,135cd/m ²	500nm		
				17Td	0,401cd/m ²	650nm		
REEVES (1918)	Flimmerverfahren					490-640nm	13	
SO (1920)	Flimmerverfahren		1,5°	ca. 168Td	ca. 3,58cd/m ²	500-680nm	20	16-48
GIBSON & TYNDALL (1923)	Kleinstufenverfahren	0,2x1,25mm - 0,8x1,25mm in Abh. λ	3°	43Td	0,97cd/m ²	490-680nm	14	
				11Td	0,24cd/m ²	430-740nm		
				9Td	0,195cd/m ²			

Tabelle 3: Untersuchungen und Untersuchungsparameter zur Entstehung der $V(\lambda)$ -Funktion (Quellen der Autoren sind zitierter Quelle zu entnehmen)¹⁸ [vgl. VIKARI ET AL. 2005]

Spezifisch herauszugreifen sind die Untersuchungen von IVES, bei welchen die Versuchsbedingungen so gewählt waren, dass die Ergebnisse der Methoden Flimmerphotometrie und dem Direktvergleich der Helligkeit gleiche Ergebnisse erzielten. Wie in Kapitel 4.1.1 dargelegt wird, ist dies für gewöhnlich nicht der Fall. Die Daten von HYDE ET AL. beruhen auf der Messung von 18 Wellenlängen im Bereich von 500-660 nm. Es wurde kein Bestreben unternommen, die Beleuchtungsstärke des Referenzfeldes konstant zu halten, sodass diese während der Untersuchungen variierte. Weiterhin entschieden sich die Autoren, den untersuchten Kernwellenlängenbereich um zwei weitere Untersuchungen zu erweitern, HARTMAN (1918) zu der Wellenlängenregion 400-490 nm und HYDE & FORSYTHE (1915) zum Bereich 670-760 nm, wodurch schon zu diesem Zeitpunkt eine Hybridfunktion erzeugt wurde. In der Untersuchung von REEVES (1918) fehlen Angaben zur Größe der genutzten künstlichen Pupille und der Feldgröße, insofern auch Angaben zum Adaptationsniveau. SO (1920) publizierte Daten von Probanden mit einem japanisch-ethnologischen Hintergrund. Einer Hypothese, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen den Ethnologien aus SO und den verbleibenden Studien gibt, konnte nicht positiv entsprochen werden¹⁹.

¹⁸ KHANH (2009) hat in einem Artikel auch die Quelle VIKARI ET AL. (2005) genutzt. In der Spalte "TP" symbolisiert die obere Angabe die Gesamtanzahl der Testpersonen einer Untersuchung. Die darunter stehenden Angaben stellen keine zusätzlichen Probanden dar, sondern sind bereits in der Gesamtanzahl inklusive.

¹⁹ Betrachtet man z. B. Untersuchungen zum Absorptionsverhalten der Augenlinse zwischen Briten und Ägyptern [WEALE ET AL. 1959] sowie zur linsenbestimmten Fluoreszenz von Einwohnern in Atlanta und Oregon [LERMAN 1988], ergeben sich Unterschiede. Ob sich diese ggf. signifikant auf eine ethnologisch differenzierte spektrale Hellempfindlichkeitskurve auswirkt, bleibt zu untersuchen, obwohl die CIE in der Publikation 41 von keiner Notwendigkeit der ethnologischen Anpassung, also einer Variation von $V(\lambda)$, ausgeht.

In diesem Kontext geben die Studien von GIBSON & TYNDALL in mehreren Punkten Anlass zu kritischen Überlegungen. Beispielsweise variierte auch bei den genannten Autoren die Leuchtdichte des Referenzfeldes. Zum langwelligen Ende hin lag die Leuchtdichte bei 34 cd/m^2 , zum kurzwelligen Ende bei $42,5 \text{ cd/m}^2$ und bei 580 nm sogar bei 170 cd/m^2 . Des Weiteren wurden die Probanden in zwei Gruppen unterteilt, welche mit dem Attribut „gut“ und „schlecht“ Bewertung fanden. Im Zuge einer gemittelten Hellempfindlichkeitskurve wurden die evaluierten Werte der Gruppe „Gut“ mit dem Faktor 2 gewichtet, um deren potentielle Datenreproduzierbarkeit zu berücksichtigen. [vgl. VIIKARI ET AL. 2005]

Betrachtet man die Attribute aus Tabelle 3 in ihrer Gesamtheit fällt auf, dass:

- die Probanden sich aus jungen Personen rekrutierten und somit keine gerontologischen Merkmale erfasst wurden,
- die Mehrzahl der Untersuchungsergebnisse mit dem Flimmerverfahren gewonnen wurde,
- das Leuchtdichteadaptationsniveau grundsätzlich nicht im photopischen Bereich liegt, sondern im Mesopischen (man beachte hier die Interaktion der Inputkanäle)²⁰ und
- die stimulierten Netzhautgrößen und damit die beteiligten Rezeptoren mitunter stark voneinander abweichen.

Es ist also inkorrekt zu glauben, die $V(\lambda)$ -Funktion sei eine unter photopischen, nur die Zapfen anregenden Bedingungen entstandene Bewertungsfunktion, welche einer diesbezüglichen menschlichen Wahrnehmung entspricht. Die Konstruktion von $V(\lambda)$ ist in Abbildung 21 gezeigt. Anzumerken ist, dass bei dieser Hybridkurve insbesondere die spektralen Enden durch die Methode des Direktvergleichs gewonnen wurden. Weiterhin bestehen Hauptteile aus I.E.S. Daten, welche teilweise unbekanntem Ursprungs sind und somit „not a good representative of the accumulated data of the several studies“ darstellen [vgl. VIIKARI ET AL. 2005].

Das Bild der Entstehungsprozedur der $V(\lambda)$ -Kurve zeigt die von VIIKARI ET AL. beschriebene Zusammensetzung als durchgehende Linie. Die Bereiche des „Smoothing“ stellen Glättungsbereiche dar. Eine genauere Unterlegung der Untersuchungen, welche in die I.E.S Bereiche der Hellempfindungsfunktion eingehen, ist SHARPE ET AL. (2005) zu entnehmen. Zur Kenntlichmachung sind diese spektralen Abschnitte eingefärbt und mit Grenzen aus den Untersuchungen resultierend versehen. Es fällt auf, dass sich die Übergangsbereiche nicht vollkommen decken, was eventuell durch die Originaldateninterpretation bedingt ist.

Weiterhin ist heute allgemein bekannt, dass im kurzwelligen Bereich der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ die betrachtete Strahlung unterbewertet wird. Bereits GIBSON & TYNDALL trafen die Aussage: „[...] for a lack of any good reason for changing them, but the relative as well as the absolute values are very uncertain and must be considered as tentative only.“ [vgl. VIIKARI ET AL. 2005]

²⁰ Auf den Π_0 und Π'_0 Kanal wird im Kapitel 3.2 eingegangen. Diese unterscheiden sich in der Weiterleitungsgeschwindigkeit von visuellen Signalen. Bei der Methode des Flimmerverfahrens ist die Frequenz, also eine zeitliche Komponente, für den Abgleich ausschlaggebend.

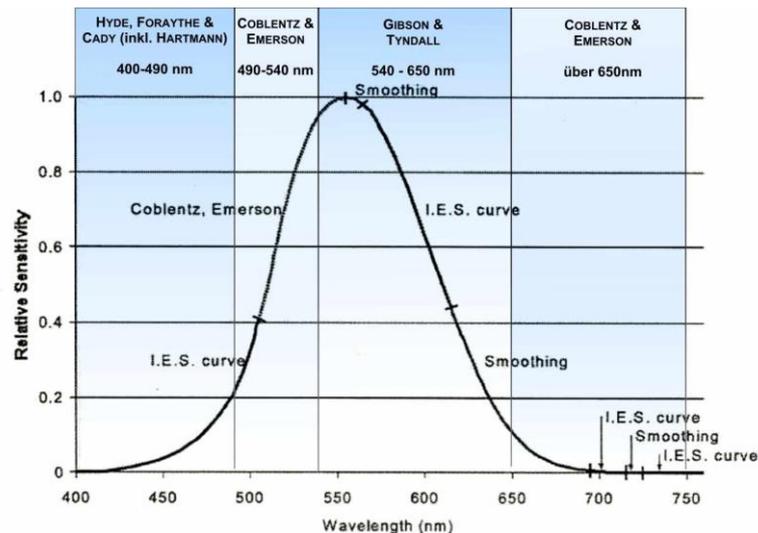


Abbildung 21: Entstehung der $V(\lambda)$ -Kurve [mod., vgl. VIKARI ET AL. 2005; SHARPE ET AL. 2005]

Bezüglich der in den Forschungsarbeiten Verwendung findenden Primärlichtquellen, wie beispielsweise Azetylen-Flammen, konnte auch schwerlich eine andere Aussage getroffen werden. Die zur Verfügung stehenden kurzwelligen Spektralanteile reichten für die Erzeugung höherer Reizintensitäten nicht aus. Dem entgegenzuwirken dauerte bis 1988. Nachdem zuerst JUDD (1951)²¹ den kurzwelligen Bewertungsbereich revidierte und später VOSS (1978) nochmals eine Modifikation unternahm, verabschiedete die Internationale Beleuchtungskommission in der CIE 86 die $V_m(\lambda)$ -Funktion [CIE TC 1-20]. Dies erfolgte unter der Maßgabe, dass die JUDD/VOSS Modifikation nicht als Ersatz von $V(\lambda)$ gelten solle, sondern eher einer Ergänzung gleichkäme. [vgl. SAGAWA 1995; VIKARI ET AL. 2005]

Jene zur $V(\lambda)$ -Erstellung genutzten Funktionen werden in Abbildung 22 der Modifizierten gegenübergestellt. Es fällt der Unterschiedsbereich bei Wellenlängen unter 480 nm auf.

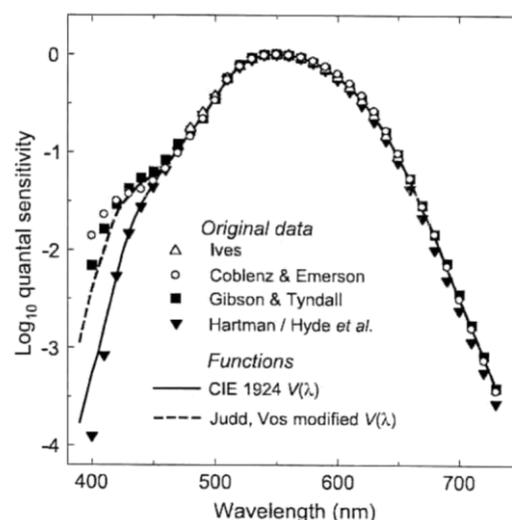


Abbildung 22: Gegenüberstellung der Originaldaten zur Entstehung der $V(\lambda)$ Funktion und der Modifikationen von $V_m(\lambda)$ [SHARPE 2005]

²¹ Die Judd'sche Modifikation betrifft experimentelle Daten unter $\lambda = 460$ nm, einem Bereich, in welchem das Absorptionsmaximum der Macula Pigmentschicht liegt (Abbildung 4) [vgl. JAMESON 1972]. Daraus folgernd ist ein 2° Normalbeobachter mit einer ungewöhnlich hohen Makula Pigmentdichte abgebildet. Die Voss'sche Korrektur fand bei Wellenlängen <410 nm statt. [vgl. SHARPE ET AL. 2005]

Auf die aktuelle lichttechnische Situation projiziert, ist die „gemachte“ Übereinkunft nicht zufriedenstellend, da zunehmend kurzweilig dominante Lichtquellen (LED, OLED, Leuchtstofflampen, Gasentladungslampen) zum Einsatz kommen. Weitere Forschungsarbeiten zur Thematik werden in Kapitel 4.1 erörtert. Während in der Wissenschaft fortwährend Gebrauch von korrigierten und exakteren Hellempfindlichkeitsfunktionen gemacht wird, scheint sich eine Änderung in der Messtechnik trotz dieser Innovationen nicht abzuzeichnen.

Bei der Erstellung der Hellempfindungsfunktion fanden zwei Methoden Anwendung. Ein Hauptteil der Daten wurde unter Verwendung der Flimmerphotometrie erhoben. Eine zweite Methode, auf welche in Kap. 3.5 eingegangen wird, ist der Heterochromatische Direktvergleich. Dieser stellt die Grundlage für das Kleinstufenverfahren dar. Kapitel 2.4 beschreibt wahrnehmungspsychologische Effekte, welche in Verbindung mit der Präsentation und dem Vergleich mehrerer Stimuli stehen. Beim Heterochromatischen Direktvergleich treten diese in verstärktem Maß auf, da die zwei gleichzeitig dargebotenen Abgleichfelder erheblich spektral differieren. Beispielsweise kann eine monochrom „grüne“ Strahlung auf eine „weiße“ Strahlung bezüglich gleichem Hellempfinden abgeglichen werden. Unter Nutzung des Kleinstufenverfahrens unterscheiden sich die Stimuli des Referenz- und des Abgleichfeldes nur um wenige Nanometer der Wellenlänge. Trotzdem wird bei einer Vielzahl an Forschungsfragen auf die Methode des Heterochromatischen Direktvergleichs zurückgegriffen. Vergleicht man die Methode der Flimmerphotometrie und mit der des Direktvergleichs, ist zu konstatieren, dass bei Ersterer nur der achromatische Kanal zur Signalweiterleitung genutzt wird, bei der zweiten Methode der chromatische und achromatische Kanal. Demzufolge ist es naheliegend, einen Unterschied in der Ausprägung der Hellempfindlichkeitsfunktion je nach verwendeter Methode anzunehmen. Zu diesem Zweck unternahm die CIE den Versuch, eine spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion aufzunehmen, welche auf dem Verfahren des Heterochromatischen Direktvergleichs beruht. 1987 fanden die Untersuchungsergebnisse in der CIE 75 Veröffentlichung. Im Gegensatz zur Entstehungsgeschichte der photopischen Hellempfindungsfunktion $V(\lambda)$, ist die von $V_{b,2}(\lambda)$ der zitierten Publikation genau zu entnehmen. Die Zusammenfassung der Untersuchungsparameter ergibt den Überblick aus Tabelle 4.

Anzahl der Untersuchungen	Jahr	Feldgröße	Adaptationslevel	Referenz	Präsentationsdauer	λ -Bereich	VP	Alter
11 Studien	1958 bis 1985	1-2°	1-572Td	Weiß; 520nm; 2860-4800K; Normlichtart C	0,004-4s; kontinuierlich	400-730nm	1-16 ($\Sigma=63$)	20-55

Tabelle 4: Übersicht der Untersuchungsparameter zur Entwicklung der $V_{b,2}(\lambda)$ -Funktion

Trotz der über 40 Jahre jüngeren Forschung, der damit verbundenen besseren Koordination und technischen Möglichkeiten, bildet auch die direktabgleichsbasierte Hellempfindungsfunktion eine Art von Hybridfunktion. Innerhalb der elf Studien fanden vier Untersuchungen mit einer Feldgröße von unter 2° statt. Das Adaptationslevel lag bei über zwei Dritteln der Experimente unter 150 Td. Zusätzlich ist anzumerken, dass der Abgleich der Testwellenlängen auf das Referenzfeld einer unterschiedlichen zeitlichen Dauer unterlag, sowie auf eine generell unterschiedlich spektral zusammengesetzte Referenz erfolgte. In einer Untersuchung nach SPERLING (1958) fand sogar ein Abgleich auf einen monochromen Reiz statt, wobei die Präsentationsdauer nur 4 Millisekunden betrug. Dieser Fall steht im Kontrast zu den anderen Untersuchungen.

Global betrachtet variierten Abgleichgrößen, -zeiten und -referenzen mitunter sehr stark. Auffällig ist auch die generell niedrige Anzahl an Versuchspersonen (VP) je Studie, die in der Mehrheit unter sechs Probanden liegt und nur zweimal über zehn Teilnehmer steigt [vgl. CIE75]. Einen Überblick über weitere in der Forschung erhobene und genutzte Hellempfindlichkeitsfunktionen, erweitert um deren Unterschiede, gibt Kapitel 4.1.1.

Der photopische Wahrnehmungsbereich ist rein zapfenbestimmt. Eine Abgrenzung zum mesopischen Bereich ist derzeit noch umstritten (siehe Kapitel 3.2). Bezogen auf die allgemeingültige, in den Messgeräten umgesetzte und in der Praxis gebräuchlichere $V(\lambda)$ -Funktion findet eine Umwandlung der radiometrischen Größen in photometrische Maßzahlen entsprechend des internationalen Einheitensystems statt. $V(\lambda)$ bildet die Grundlage der Photometrie, ist aufgrund der genutzten Flimmerphotometriemethode „frei“ von Einflüssen des chromatischen Kanals und somit als additiv anzusehen. Diese Empfindlichkeitsfunktion beschreibt nicht unbedingt die wahrgenommene Helligkeit (Luminance-Brightness-Discrepancy) (vgl. SAGAWA 1995; CIE 41). Trotz der Verbreitung und der beständigen Nutzung sollte man sich über deren Grenzen bewusst sein. Die $V(\lambda)$ besitzt nur für eine Sehobjektgröße von 2° und unter photopischen Bedingungen Gültigkeit, auch wenn dies durch die zu ihrer Entstehung führenden Studien keine Stützung findet. Nach DIN 5031 ist zu definieren: „Der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad für Tagessehen $V(\lambda)$ ist die von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) festgelegte relative spektrale Empfindlichkeit des helladaptierten Auges des Normalbetrachters.“

Skotopische $V'(\lambda)$ -Funktion

Das skotopische Sehen stellt sich als rein stäbchenbasiert dar. Obwohl das skotopische Sehen in der Beleuchtungspraxis eher eine untergeordnete Rolle spielt, soll trotzdem ein kurzer Überblick über die skotopische Hellempfindungsfunktion folgen. Einsatzgebiete liegen in der Quantifizierung von Lichtquellen über das sogenannte S/P-Verhältnis, also dem skotopisch gewichteten zum photopisch gewichteten Spektralanteil als Eingangsgröße für mesopische Modelle und als zweite stabil messbare Größe, bei welcher eine Rezeptorart aktiv ist.

Die Entwicklung einer spektralen Hellempfindlichkeitskurve der Stäbchen geht hauptsächlich auf die Daten von WALD (1945) und CRAWFORD (1949) zurück. Während WALD die Methode des absoluten Schwellenkontrasts wählte, gehen die Daten der späteren Untersuchung auf den Heterochromatischen Direktvergleich zurück. Die Zusammensetzung der gewonnenen Daten erfolgte analog zur photopischen Funktion. Auch unter skotopischen Bedingungen divergieren die Forschungsansätze neben den Methoden stark. WALD nutzte Sehzeichen von 1° Durchmesser, während CRAWFORD ein zweigeteiltes 20° Feld bei einer Adaptationsleuchtdichte von circa $3 \cdot 10^{-5}$ cd/m² wählte. Ein Unterschied im Funktionsverlauf beider Forschungsarbeiten zeigt sich im langwelligen Bereich durch einen geringfügig steileren Abfall der spektralen Empfindlichkeit bei WALD. Bei den Messungen von CRAWFORD ist eine Zapfenbeteiligung nicht auszuschließen, wodurch die veränderte Kurvenform gegenüber WALD zu erklären wäre. CRAWFORDS Untersuchungen repräsentieren eine Stichprobe von 50 Probanden im Alter von unter 30 Jahren [CRAWFORD 1949].

Studien an einzelnen Stäbchen der Retina mittels Auswertung von Photoströmen bestätigen jedoch die publizierte skotopische Empfindlichkeitsfunktion in exzellenter Weise [vgl. KRAFT ET AL. 1993]. Publiziert wurde die $V'(\lambda)$ -Funktion von der CIE 1951 als 10° basierter skotopischer Normalbeobachter. [vgl. CIE 1951; WYSZECKI ET AL. 1982]

Die Definition ist äquivalent zu $V(\lambda)$, jedoch für ein dunkeladaptiertes Auge [vgl. DIN 5031]. Zum Vergleich beider CIE Normalbeobachter sind die spektralen Empfindlichkeiten in Abbildung 23 visualisiert.

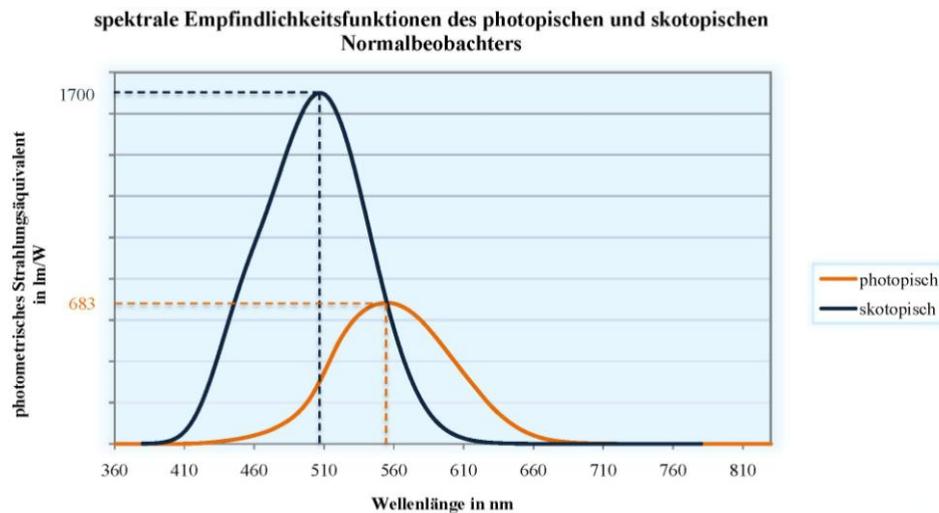


Abbildung 23: Photopische und skotopische spektrale Hellempfindlichkeitskurven der Normalbeobachter, bezogen auf das jeweilige maximale Strahlungsäquivalent [modifiziert, nach CIE 18; CIE 1951]

3.2 Bereich des mesopischen Sehens

Dem Bereich zwischen der rein photopischen und rein skotopischen Wahrnehmung, dem mesopischen Bereich, kommt eine besondere Bedeutung zu. Er ist geprägt von einer Wechselwirkung zwischen dem Zapfen- und dem Stäbchensystem und unterliegt einer stetigen Wechselwirkung beider jeweils anhaftender Wirkungsfunktion. In der Folge bewertet das Auge eine einfallende Strahlung weder nach der spektralen Hellempfindlichkeit des Zapfensystems, noch nach jener des Stäbchensystems. Eine beständige Änderung der Wahrnehmung erfolgt durch den Einfluss der zu bewertenden spektralen Komposition, des gegebenen Leuchtdichteadaptationsniveaus sowie der Stimulusgröße und deren retinaler Position [vgl. BARBUR ET AL. 2010; RAPHAEL 2010; VIKARI ET AL. 2005; etc.].

Anders als bei den in Kapitel 3.1 genannten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen gibt es derzeit noch kein empfohlenes, geschweige denn in der Anwendung praktikables Modell für die Beschreibung einer Hellempfindung im Mesopischen. Dies ist nicht zuletzt der ungeheuren Komplexität der am mesopischen Sehen beteiligten Prozesse zuzuschreiben, sondern auch der sich mitunter widersprechenden Angaben zum mesopischen Sehen, dessen Prozesse und Interaktionen und der Bereichsabgrenzung des mesopischen Sehens. Für die mesopische Wahrnehmung ergibt sich eine schier unüberschaubare Anzahl an Einflussfaktoren, welche es der internationalen Forschung erschwert eine akzeptable Lösung zu finden und zu verabschieden. Neben den genannten Problemen im photopischen Bereich ergeben sich ähnliche Schwierigkeiten verstärkt durch das Auftreten eines 4. Rezeptors, den Stäbchen. Durch eine immerwährende Veränderung der Wahrnehmungsprozesse besteht keine Möglichkeit der Entwicklung einer beschreibenden mesopischen Empfindlichkeitskurve über alle zustande kommenden Adaptationsbereiche. Daraus resultiert der Schluss, dass sich der mesopische Bereich nur durch komplexe mathematische Beschreibungen erfassen lässt. Eine beständige Abhängigkeit der Ergebnisqualität ist durch die Eingrenzung der zu untersuchenden Variablen, der Erhebungsmethoden und der Exaktheit der Forschung an sich gegeben.

Aus Abbildung 23 sind die statischen Zustände der photopischen und skotopischen Empfindlichkeitsfunktionen zu erkennen. Zwischen diesen befindet sich der mesopische Bereich. Es stellt sich an dieser Stelle die Frage, wie sich der mesopische Bereich anhand der Leuchtdichte abgrenzen lässt. Sekundär bedingt die Spezifikation der mesopischen Systemgültigkeit auch die Grenzen der beiden verbleibenden Zustände der visuellen Wahrnehmung. Bisher ist eine eindeutige Klärung nicht erfolgt. Diesbezüglich soll in Abbildung 24 eine Übersicht der in Normen, Empfehlungen und wissenschaftlichen Studien unternommenen Eingrenzung vermittelt werden. Auch wenn sich die Abgrenzung zum skotopischen Bereich um eine Dekade unterscheidet, zeigt sich diese weniger variierend als zum photopischen Bereich. In Folge der Häufigkeitsverteilung der Angaben ist eine obere Abgrenzung zwischen 3-10 cd/m² zu suchen.

Eine in die Darstellung nicht integrierte Publikation geht unter speziellen Bedingungen sogar von einer Stäbchenbeteiligung von bis zu 150 cd/m² (1000 skotopische Troland) aus [AGUILAR ET AL. 1954]. Bestätigung findet dieser Grenzwert durch WYSZECKI & STILES (1982) die von einer absoluten Abstinenz des Stäbchenmechanismus oberhalb von 3000 skotopischen Troland sprechen. In Anbetracht der Auswahl an vorliegenden Daten ist kritisch zu hinterfragen, ab wann ein Stäbchen- oder Zapfenbeitrag einen signifikanten Einfluss auf die zu bewertende Situation hat und somit erweiterte Grenzen des mesopischen Bereichs rechtfertigt.

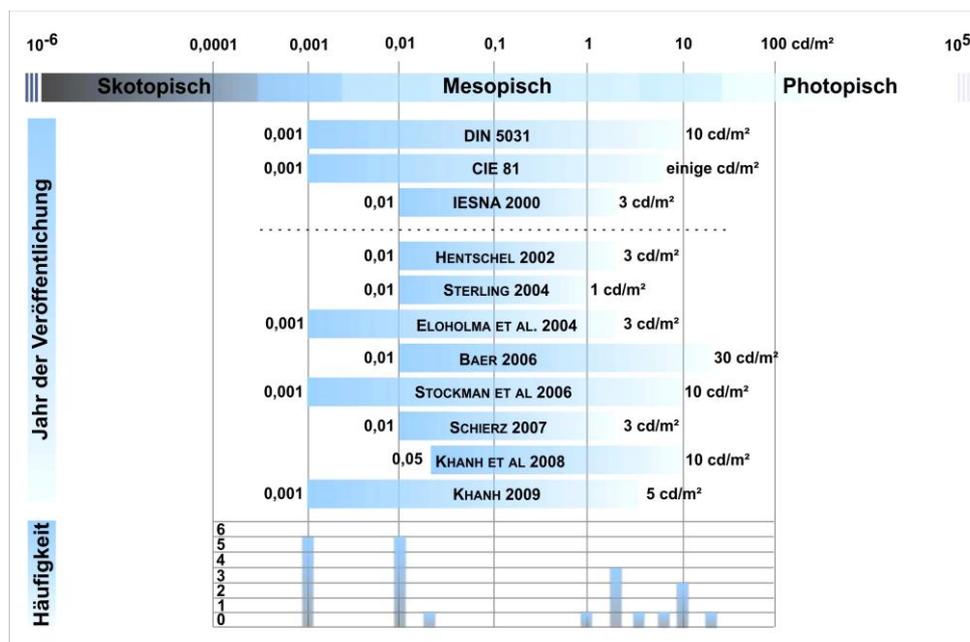


Abbildung 24: Übersicht der Eingrenzung des mesopischen Bereichs unter Angabe der photopischen Leuchtdichte (unterteilt nach lichttechnischen Institutionen & wissenschaftlichen Veröffentlichungen; Grenzen von KHANH ET AL. 2008A betreffen insb. Applikationsbereich der Kfz- und Verkehrslichttechnik)

Kennzeichnend für den mesopischen Bereich, gleich welchen Umfang dieser hat, ist die Interaktion zwischen den Rezeptoren. Wie komplex diese ist und welche Auswirkungen für photometrische Quantifizierungsversuche, beispielsweise die Flimmerphotometrie, vorhanden sind, zeigen psychophysikalische und elektroretinographische Untersuchungen [SHARPE ET AL. 1989; STOCKMAN ET AL. 1991]. Neben dem Dualismus der Rezeptorarten existiert weiterhin ein Dualismus in retinalen Verarbeitungskanälen, welcher speziell die Stäbchenflimmersignale betrifft. Diese Dualität betrifft die sogenannten Π_0 und Π'_0 Kanäle, welche sich in Abhängigkeit der Intensität des Lichtreizes im zeitlichen Übertragungsverhalten und dem Verlauf des zeitlichen Auflösungsverhaltens unterscheiden. Hierbei stellt Π_0 einen langsamen Verarbeitungskanal dar, welcher sehr empfindlich ist und bei skotopischen Adaptationsniveaus aktiv ist, während Π'_0

eine schnelle Signalverarbeitung vornimmt und relativ unempfindlich ist. Eine Hauptfunktion von Π'_0 ist die Flimmerentdeckung innerhalb mesopischer Bedingungen. Durch die Forschungsergebnisse ist belegt, dass die Zapfensignale einen Einfluss auf Π'_0 haben und dessen Empfindlichkeit reduzieren können. Bei Untersuchungen an Dichromaten wurde festgestellt, dass für den Einfluss L- und M-Zapfen maßgebend sind. Dies lässt den Schluss zu, dass Signale den Π'_0 -Pfad nutzend direkt in die Bahnen des Zapfensystems übergehen, während der alternative Kanal Zwischenschritte der Stäbchenbipolar-, AII-Zellen und Ganglienzellen verlangt (vgl. Abbildung 9). Durch die Überlagerung beider Stäbchenkanäle und deren unterschiedliches Übertragungsverhalten führt dies zu einer Auslöschung der Stäbchensignale bei einer Frequenz von 15 Hz. Ein Flimmern von 7,5 Hz zweier Stimuli ist somit nicht wahrnehmbar [vgl. SHRAPE ET AL. 1993].

Neben diesem Effekt, der Einflussnahme der Zapfen auf das Stäbchensignal in Abhängigkeit der Reizintensität, der unterschiedlichen Empfindlichkeiten der Rezeptoren etc. ist es kaum möglich, über etablierte Verfahren der Flimmerphotometrie zu einer mesopischen Bewertungsfunktion zu gelangen. Nach KINNEY (1964) ist es nicht ratsam, die Flimmerphotometrie unter mesopischen Bedingungen anzuwenden. Es zeigt sich einmal mehr, wie komplex die Vorgänge im Zwischenbereich der Wahrnehmung sind. BERMAN (2005) hingegen zeigt weitere grundlegende Probleme bei der Entwicklung eines mesopischen Systems der Photometrie auf. Während einige von BERMAN getroffene Aussagen schleistungorientierte Aspekte umfassen, wie die Berücksichtigung von bewegten Objekten als Detektionsparameter und der bisher nicht untersuchte Einfluss von örtlich unbekanntem Sehobjekten bei Untersuchungen auf die Reaktionszeit, stellen die verbliebenen Punkte auch Probleme in der helligkeitsorientierten mesopischen Forschung dar.

1. Die Interaktion der Rezeptoren ist abhängig von der Bestrahlungsstärke. Eine einfache mesopische Photometrie kann keinesfalls den Prinzipien der Additivitätstheorie²² folgen, welche grundlegend für die photopische Photometrie ist. Trennt man diese nach einer rezeptorartbasierten Photometrie auf, so folgt die jeweilige dem Prinzip der Additivität und eine Linearkombination der Rezeptorbeiträge kann für die Beibehaltung der Basisgrößen in einer mesopischen Photometrie genutzt werden.
2. Es wurden eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen durchgeführt, wobei „keine“ den chromatischen Einfluss auf die Hellempfindung kontrollierte. Weiterhin herrscht eine Unvergleichbarkeit der Studien, welche sich mitunter sogar widersprechen. Die Untersuchung eines vollen Sehfeldes fand nicht statt.
3. Durch bisher kaum betrachtete spektrale Verteilung kann nicht auf den Einfluss der spektralen Abhängigkeit bezüglich Stäbchen und Zapfen gefolgert werden.

Jedoch gelten zu den genannten Punkten Einschränkungen. Dass eine einfache Linearkombination zwischen $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ (oder ähnliche) dem Additivitätskriterium folgen kann, ist nur gegeben, wenn man eben diese achromatisch gewonnenen Funktionen nutzt, sich auf diese bezieht. Eine

²² Es erfolgt eine Unterscheidung von absoluter und relativer Additivität. Eine absolute Additivität liegt vor, wenn zwei Reize (R_n) zu einem Dritten als gleich hell erkannt wurden, somit der resultierende Reiz (R_0) um einen Faktor (i) so hell sein muss ($R_1+R_2= iR_0$). Sind die Reize mit normierten Vorfaktoren (f_n) versehen und addiert gleich hell wie R_0 , spricht man von relativer Additivität.

Andere Prinzipien (Gesetze der Photometrie oder auch Abney-Gesetze) sind die Symmetrie, wenn $R_1=R_2 \rightarrow R_2=R_1$, die Transitivität, $A=B$ & $B=C \rightarrow A=C$ und die Proportionalität, $A=B \rightarrow fA=fB$ [vgl. WYSZECKI ET AL. 1982].

mesopische Hellempfindung, genau wie eine photopische, berücksichtigt jedoch auch immer den chromatischen Beitrag der Zapfen. Von einer Linearität und Additivität kann nunmehr nicht mehr gesprochen werden. Der zweite Punkt ist aktuell nur teilweise haltbar. Es wurden Untersuchungen zu chromatischen Einflüssen getätigt. Diesbezüglich sei insbesondere auf die Vierkomponentenmodelle der CIE 141 verwiesen, sowie auf SAGAWA 2006 (siehe auch Kapitel 4.2). Die angesprochene Unvergleichbarkeit der Untersuchungen ist jedoch ein gravierender Missstand, der bis heute existiert. Neben unterschiedlichsten Versuchsdesigns, welche durchaus ihre Berechtigung haben, wurde bisher nur durch die CIE eine Bestrebung unternommen, existierende Untersuchungen forscherverübergreifend zu vergleichen [vgl. CIE 141]. TREZONA 2001 weist jedoch schon in ihrem Minority Report darauf hin, zumindest einen Stimulus so zu wählen, dass dieser als Referenz zur Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen dient. Ob der vorgeschlagene Reiz bei 555 nm immer anzuwenden ist, bleibt zu diskutieren.

Genannter Punkt 3 betrachtet wohl speziell eine verstärkte Orientierung an spektralen Daten für die Bewertung durch einzelne Rezeptorarten bzw. -typen. Insbesondere bei der Verwendung integraler Größen der Photometrie gehen für eine weitere Auswertung der Daten die im Spektrum steckenden Informationen verloren.

Auch STOCKMAN ET AL. (2006) weist in diesem Zusammenhang auf die Komplexität im mesopischen Bereich hin. Es seien die wichtigsten Aspekte genannt.

1. Es sind mehrere Rezeptorarten aktiv und bewirken eine nichtadditive Signalzusammensetzung aufgrund der Rezeptorcharakteristika und der folgenden Kanäle in der Signalverarbeitung. Eine einfache Linearkombination skotopischer und photopischer Empfindlichkeitsfunktionen kann dem nicht gerecht werden. Zu einem ähnlichen Schluss kommen auch WALTERS & WRIGHT (1943): „In any event, the constant brightness luminosity functions which we have recorded cannot be composite luminosity curves built up from the summed rod and cone curves taken in some given proportions.“
2. Es herrscht eine Interaktion zwischen den Rezeptorarten, welche starke Nichtlinearitäten aufweist.
3. Im Bereich des mesopischen Sehens sind Stäbchen und Zapfen aktiv, welche sich durch ihre räumliche Verteilung in der Retina unterscheiden. Mesopische Hellempfindlichkeitsfunktionen sind somit in Abhängigkeit dieses Fakts zu betrachten.
4. Durch die rezeptorbedingten Eigenschaften ist es nur schwer möglich, mesopische Messungen verallgemeinernd vorzunehmen. Variablen der Stimulusgröße, -position und spektralen Komposition, etc. wirken auf die Studienergebnisse.

Bisher existiert kein vereinheitlichtes System zur Beschreibung der Wahrnehmung im mesopischen Bereich. Aufgrund der visuellen Vorgänge und deren Komplexität bleibt zu vermuten, dass es ein allgemeingültiges mesopisches Beschreibungssystem nie geben wird. Es lässt sich somit die Frage formulieren, wie sich die mesopische Wahrnehmung durch welche Parameter und in welchen Grenzen hinreichend gut beschreiben lässt, um diese objektiv abbilden zu können.

3.3 Photometrische Bewertung mittels SI-Basiseinheit

Im Zuge der vorliegenden Forschungsarbeit werden helligkeitsbasierte Aspekte im mesopischen Bereich mit dem Ziel untersucht, diese in empirische Zusammenhänge zu bringen und einer mathematischen Beschreibung zuzuführen. Die Grenzen des mesopischen Bereichs sind durch die Leuchtdichte gekennzeichnet, welche mit dem Hellempfinden am ehesten korreliert. Die Leuchtdichte beruht wiederum auf der SI-Basiseinheit *Candela*, deren Definition und Besonderheiten erörtert werden müssen.

REEB 1962 definierte die Photometrie als „[...] das Arbeitsgebiet, das es zur Aufgabe hat, Größen zu definieren und zu messen, die für den von einer Lichtstrahlung hervorgerufenen Helligkeitseindruck maßgebend sind.“

Weiterhin wird postuliert: „Die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges bildet die Grundlage für die Definition sämtlicher lichttechnischer Einheiten und Grundgrößen. Sie ist die Empfindlichkeit des normalen helladaptierten Auges für monochromatisches Licht jeder sichtbaren Wellenlänge bei gleicher Strahlungsleistung“. [DIN84]

Aus beiden Definitionen ist der Kernpunkt des Hellempfindens herauszugreifen, welcher durch die Leuchtdichte quantifiziert wird [vgl. GALL 2004]. Die Strahlungsleistung stellt eine radiometrische Größe dar, welche durch die Basiseinheit *Candela* (*cd*) eine photometrische Beschreibung mittels Beurteilung durch die Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ erhält. Die Bezeichnung *Candela* (lat. Kerze) geht international auf die Nutzung einer Kerze als Vergleichsnorm zurück, welche auch als Hefner-Kerze bekannt ist. Abgelöst wurde diese durch eine elektrisch betriebene Kohlefadenglühlampe als Lichtnormal und bildete die Internationale Kerze (IK) als Einheit der Lichtstärke. 1940 wurde die Einführung eines Hohlraumstrahlers bestimmter Temperatur als weltweit einheitliches Primärnormal für die *Candela* vorgeschlagen. Es galt bis Oktober 1979 die Definition: „Die *Candela* ist die Lichtstärke in senkrechter Richtung von einer 1/600000 Quadratmeter großen Oberfläche eines schwarzen Strahlers bei der Temperatur des beim Druck 101325 Newton durch Quadratmeter erstarrenden Platins.“ Jedoch ist mit der Beschreibung des schwarzen Strahlers durch das Planck'sche Strahlungsgesetz keine empfindungsbasierte Größe geschaffen, welche dem Anspruch der Photometrie gerecht wird. Durch das Bestreben SI-Basiseinheiten mittels Konstanten zu beschreiben, um Artefakten in der Messtechnik zu entgehen, wurde 1979 die Definition des *Candela* in folgende Form gebracht: „Die *Candela* (*cd*) ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt durch Steradian beträgt.“ Mit der neuen Definition wird das Primärnormal der alten Definition durch die Konstante des photometrischen Strahlungsäquivalents ersetzt. [vgl. SAUTER 2005]

Eine Bewertung der Helligkeit mittels der Leuchtdichte erfolgt ausgehend vom spektralen Strahlungsfluss $\Phi_{e,\lambda}$:²³

$$\Phi_{e,\lambda} = \frac{dQ_e(\lambda)}{d\lambda} \left[\frac{\text{W}}{\text{nm}} \right] \quad (\text{Gl.2})$$

mit Q_e als Strahlungsenergie und λ als Wellenlänge über die Berechnung des Lichtstroms Φ_v :

²³ Der Index e entspricht der Kennzeichnung für energetische Größen, v steht für visuelle Maßzahlen.

$$\Phi_v = K_m \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad [\text{lm}] \quad (\text{Gl.3})$$

wobei K_m das maximale photopische Strahlungsäquivalent darstellt und $V(\lambda)$ die spektrale Hellempfindungsfunktion für den 2° Normalbeobachter beschreibt.

Berücksichtigt man neben dem Lichtstrom den Raumwinkel, ergibt sich die Lichtstärke I_v in Abhängigkeit der Projektionsrichtung zur Flächennormalen:

$$I_v(\gamma) = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \left[\frac{\text{lm}}{\text{sr}} = \text{cd} \right] \quad (\text{Gl.4})$$

Durch den Bezug der Lichtstärke auf die scheinbar leuchtende (projizierte) Fläche ergibt sich letztendlich die Leuchtdichte L_v :

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{dA_p \cdot d\Omega \cdot \cos \varepsilon_p} = \frac{dI_v(\gamma)}{dA_p \cdot \cos \varepsilon_p} \left[\frac{\text{lm}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (\text{Gl.5})$$

unter Zuhilfenahme der projizierten Fläche A_p und deren Abstrahlrichtung ε_p zur Flächennormale. [vgl. GALL 2004]

Ausschlaggebend für die Berechnung jeder photopischen Größe ist die Definition des Strahlungsäquivalents K_0 . Es existieren zwei spektrale Hellempfindungsfunktionen, welche sich in ihrem Verlauf in einem Punkt schneiden (Abbildung 23). Im Bestreben, für den photopischen und skotopischen Normalbeobachter ein Strahlungsäquivalent als Konstante zu bestimmen, wurde $K_0 = 683 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$ festgelegt. Aus Gleichung 6 mit Annahme der Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, der angegebenen Frequenz $\nu_0 = 540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ und der Brechzahl in der Luft von $n = 1,00028$ ergibt sich eine Wellenlänge $\lambda_0 = 555,016 \text{ nm}$.

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{\nu_0 \cdot n} \quad [\text{nm}] \quad (\text{Gl.6})$$

Mithilfe der vorliegenden Daten lassen sich das photopische Strahlungsäquivalent K_m sowie das skotopische Strahlungsäquivalent K'_m berechnen. [vgl. SAUTER 2005]

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{K_0}{V(\lambda_0)} = \frac{683 \text{ cd} \cdot \text{sr}}{0,9999976 \text{ W}} = 683,002 \frac{\text{cd} \cdot \text{sr}}{\text{W}} \\ K'_m &= \frac{K_0}{V'(\lambda_0)} = \frac{683 \text{ cd} \cdot \text{sr}}{0,401753 \text{ W}} = 1700,13 \frac{\text{cd} \cdot \text{sr}}{\text{W}} \end{aligned} \quad (\text{Gl.7})$$

In der Literatur findet man die Angaben $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ bzw. $K'_m = 1699 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Streng genommen ist nach der Definition der Einheit *Candela*, ergo auch für die Leuchtdichte, zwischen photopischen und skotopischen [cd] zu unterscheiden. Wird ein Wert für die Leuchtdichte ohne Index angegeben, entspricht dieser einem photopischen 2° Normalbeobachter. Werden von $V(\lambda)$ differierende spektrale Empfindlichkeitsfunktionen zur Überführung einer spektralen Verteilung in die photometrische Größe der „Leuchtdichte“ genutzt, ist primär ein dafür gültiges Strahlungsäquivalent zu berechnen und eine gesonderte Notation vorzunehmen. Ohne diesen Berechnungsschritt handelt es sich **nicht** um die eigentliche Leuchtdichte, basierend auf der existierenden Definition. Dieser Sachverhalt wird für das weitere Verständnis dieser Arbeit essentiell sein und in Kapitel 4.2 erneut aufgegriffen.

3.4 Psychophysikalische Beschreibung der Hellempfindung als Prinzip der äquivalenten Leuchtdichte

Wie auch in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt, ist es schwer, eine Empfindung in Maßzahlen auszudrücken. Durch die forschungsbasierte Fragestellung einer Quantifizierung der Hellempfindung im mesopischen Bereich gewinnt genannte Problematik weiter an Komplexität. Dies äußert sich in einer nur photopischen bzw. skotopischen Messbarkeit der zu erhebenden Größen sowie einer Interaktion der beteiligten Rezeptoren und variablen Anpassung von Sehvorgängen an die verschiedenen Leuchtdichteadaptationsniveaus.

Im Kernpunkt der psychophysikalischen Beschreibung steht somit der Mensch als Regelsystem selbst. Dementsprechend besteht die Aufgabe der Psychophysik darin, die Empfindungen und Reaktionen des Menschen in Abhängigkeit physikalischer Einflussfaktoren zu messen. Gegenüber objektiven Messungen zeichnen sich psychophysikalische Untersuchungen dadurch aus, dass deren experimentelle Werte aus Reaktionen, Urteilen und Verhaltensweisen der Probanden stammen, die erhobenen Werte subjektiv sind und den individuellen Standpunkt widerspiegeln. Gewonnene Daten sind keinem Standard unterworfen und sind durch innere und äußere Einwirkung von Variablen beeinflussbar. Demzufolge ist mit einer erhöhten Varianz innerhalb der Experimente zu rechnen. Eine folgende deskriptive und inferenzstatistische Datenauswertung ist für die hypothesenbasierte Ergebnisinterpretation somit unumgänglich. [vgl. GOLDSTEIN 2008]

Für die Mesopia-Forschung stehen als standardisierte, bestimmbare Anker $V(\lambda)$ bzw. $V'(\lambda)$ basierte Größen zur Verfügung. Im erweiterten Sinne können zusätzlich spektralradiometrisch gemessene und mit einer differierenden spektralen Empfindlichkeitsfunktion versehene Größen genutzt werden. Dem Menschen fällt es an sich äußerst schwer, absolute Einschätzungen von Reizen zu geben, ob dies die Einschätzung eines Gegenstands bezüglich seiner Masse betrifft oder eine Beurteilung der Helligkeit (Leuchtdichte) eines Umfelds. Eine messäquivalent korrekte Aussage wird schwer zu finden sein. Leichter fällt es dem visuellen System des Menschen, relative Stimulusbewertungen vorzunehmen und somit Leuchtdichten bezüglich deren Helligkeit zu beurteilen und einzustellen [vgl. BODMANN 1961].

Aus dem genannten Ansatz folgt das Prinzip der äquivalenten Leuchtdichte L_{eq} ²⁴. Ausgangspunkt stellen zwei oder mehrere Stimuli dar, welche durch objektive, also messtechnische Größen erfassbar sind. Für die relative Beurteilung durch den Probanden dient ein dargebotener Reiz als Referenz und damit als subjektiver Nullpunkt. Die Testreize werden anhand der festgelegten Referenz durch den Menschen beurteilt. Diesbezüglich hat die CIE 1963 folgende Definition für L_{eq} verabschiedet:

„Luminance of a comparison field in which the radiation has the same relative spectral distribution as that of a Planckian radiator at the temperature of freezing platinum and which has the same brightness as the field considered under the specific photometric conditions of measurement; the comparison field must have a specified size and shape which may be different from that of the field considered. Note: A comparison field may also be used in which the radiation has a relative spectral distribution different from that of a Planckian radiator at the temperature of freezing platinum (T=2042 K), if the equivalent luminance of this field is known under the same conditions of measurement.”

²⁴ engl. equivalent luminance

Konträr stellt sich die genannte Beschreibung jedoch zur aktuell gültigen Definition des photometrischen Systems dar. Derzeit beruht dieses nicht auf der standardisierten Ausstrahlung eines Plank'schen Strahlers, sondern auf einer Wellenlänge von 555 nm. Vielmehr sollte die äquivalente Leuchtdichte und somit das äquivalente Hellempfinden das Verhältnis eines Teststimulus bezüglich einer Referenz zum Ausdruck bringen. [vgl. SCHANDA 1998]

Die Bestimmung der äquivalenten Leuchtdichte lässt sich nach dem folgendem Grundsatz durchführen. Betrachtet man zwei auf gleiche Helligkeit einzuschätzende Reize, wobei L_{ref} die Leuchtdichte des Referenzstimulus ist, stellt die Leuchtdichte des Vergleichsstimulus jene Größe einer potentiell gleichen Hellempfindung dar, wenn:

$$L_{ref} = L_{test} = L_{eq} \quad (Gl.8)$$

ist. Als Verhältnis geschrieben ergibt sich:

$$V_{eq} = \frac{L_{test}}{L_{ref}} = \frac{Km \int_{380}^{780} L_{e,\lambda,test} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{Km \int_{380}^{780} L_{e,\lambda,ref} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (Gl.9)$$

Auf den Untersuchungsbereich der Mesopie übertragen, könnten theoretisch mesopische Empfindlichkeitsfunktionen für einen Adaptationszustand anstelle von $V(\lambda)$ eingebracht werden. Die Schwierigkeit diesbezüglich ist an verschiedensten Stellen dieser Arbeit dargelegt.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, zwei unterschiedliche Reize auf gleiches Hellempfinden bewerten zu lassen, sie jedoch in einem geschlossenen System der spektralen Hellempfindlichkeitsbewertung zu betrachten. Für die äquivalente Leuchtdichte des Testreizes ergibt sich dementsprechend:

$$L_{eq} = \frac{Km \int_{380}^{780} L_{e,\lambda,test} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{Km \int_{380}^{780} L_{e,\lambda,ref} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot L_{ref} \quad (Gl.10)$$

Wird beispielsweise eine spektrale Verteilung von $L=1 \text{ cd/m}^2$ als Referenz dargeboten und ein zweiter Stimulus auf $L=0,5 \text{ cd/m}^2$ als „gleich hell“ zur Referenz eingestellt, so beträgt die äquivalente Leuchtdichte $L=0,5 \text{ cd/m}^2$. [vgl. KOKOSCHKA 1980; BODMANN 1992]

Das vorgestellte Prinzip unterliegt einer reizzentrierten Methodik. Es gilt, die Mächtigkeit eines Probandenurteils in Abhängigkeit von der physikalischen Reizstärke zu bestimmen. Innerhalb physiologisch-mesopischer Maßstäbe sollte die Erregungsgröße proportional zur absorbierten Strahlung durch die Retina sein. Eine besondere Bedeutung obliegt der äquivalenten Leuchtdichte in der Mesopie, da durch sie nicht nur die Hellempfindung beschrieben wird, sondern diese auch für die Kontrastempfindung und visuelle Leistung maßgebend ist. [vgl. KOKOSCHKA 1972; 1980]

3.5 Untersuchungsmethoden zum Abgleich der Hellempfindung

Für die Untersuchung der Hellempfindung haben sich verschiedene Methoden etabliert. Einen sehr guten Überblick gibt Kapitel 5 „Visual Equivalence and Visual Matching“ von WYSZECKI & STILES (1982) und die Arbeit von ENDERS (1955). Je nach Methode und der dieser zugrunde liegenden Herangehensweise können sich die Ergebnisse unterscheiden. Ein grundlegendes Verständnis ist sowohl für die Ergebnisinterpretation als auch für eigene Forschungen unabdinglich [vgl. HARTGE 1991]. Anhand der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen aus Kapitel 4.1.1 lässt sich dies anschaulich nachvollziehen.

Grundsätzlich lassen sich die Methoden in zwei Ansätze unterteilen. Im ersten, dem vergleichsbasierten Ansatz, werden die zu untersuchenden Größen, wie beispielsweise die Hellempfindung, über direkte Größen erhoben. Sehleistungsorientierte Methoden gehen dagegen von stellvertretenden Größen aus, um Rückschlüsse auf die eigentliche Forschungsvariable zu ziehen. In Tabelle 5 ist eine Einordnung der wichtigsten Methoden gegeben. Die Differenzierung zwischen separierten, sequentiellen und sukzessiven Vorgehensweisen wird auch von FOTIOS ET AL. (2009A) unternommen sowie derzeit im CIE TC 1-80 diskutiert. Auf die wichtigsten Methoden wird im Anschluss ausführlicher eingegangen. Oftmals sind Methoden und deren Kriterien in der Anwendung kombiniert, wodurch sich nur schwer eine absolute Einordnung gewährleisten lässt.

Untersuchungsmethode			
Vergleichsbasiert			Schleistungsbasiert
Separiert	Simultan	Sukzessiv	
Memory Brightness Matching	Direct Brightness Matching	Flicker Photometry	Visuelle Schärfe
		Minimal Motion	Absolute Schwelle
	Minimal Distinct Border	Verschmelzungsfrequenz & Kritische Frequenz	Reaktionszeit
			Blendgrenze
	Farbmischung	Successive Binocular Brightness Matching	Detektionsleistung
			Pupillenreflex
		Spektrale Stoffkennzahlen	
		Elektroretinogramm	

Tabelle 5: Methodenübersicht zur Bestimmung der Hellempfindung, spektralen Hellempfindlichkeit [vgl. FOTIOS 2009A; KHANH 2004; ENDERS 1995; RAPHAEL 2010]

Memory Brightness Matching (MBM)

Das MBM-Verfahren ist gedächtnisbasiert und orientiert sich an einem Ankerreiz, welcher durch Adaptation oder Einprägen beim Probanden vorhanden ist. Zielsetzung bei dieser Methode ist es, einen Referenzreiz, welcher tendenziell in derselben räumlichen Lokalisierung auftritt, aus dem Gedächtnis auf gleiche Helligkeit des Referenzreizes einzustellen. Ein Problem bei der Anwendung dieser Methode ist die zuvor festzulegende Zeit der Ankerreizbildung und der Abschwächung der Erinnerung an den Referenzreiz über die Zeit der Einstellung oder anders, die Bewertung des Testreizes zum Ankerreiz. Typische Anwendungsszenarien sind neben der Beurteilung der Hellempfindung [BODROGI ET AL. 1999] auch Untersuchungen zum Kontrasterinnerungsvermögen [GALL 1983; BODROGI ET AL. 2001] und zur Einschätzung der Farberscheinung [MIZOKAMI ET AL. 2006].

Direct Brightness Matching (DBM)

Direct Brightness Matching, welches auch mithilfe schmalbandiger Reize in heterochromatischer Abwandlung besteht, ist eine Form des Direktvergleichs zweier Reize. Beide Reize werden gleichzeitig und räumlich getrennt voneinander dargeboten, wobei der eine Stimulus die Referenz, der andere das einstellbare, zu bewertende Testfeld ist. Die Aufteilung des gesamten in die Bewertung eingehenden Sehfeldes kann unterschiedlich sein. So können sich zwei Kreis- oder Rechteckhälften nebeneinander befinden, oder auch zwei sich umgebende Kreisflächen zum Abgleich dienen. KHANH (2004) beschreibt, dass der Abgleich beider Stimuli an einer Trennkante zwischen der Referenz und dem Testfeld stattfinden soll. Insbesondere bei kleinen Sehwinkeln ist hier der Effekt der lateralen Inhibition zu beachten. Während die Referenz konstanten Bedingungen unterworfen ist, sind die Stimulusstrahldichten der Testlichtquelle variierbar. Es existiert die Möglichkeit, auf gleiche Hellempfindung einzustellen, also auch auf die kleinste noch zu bemerkende Schwelle. Letztere bietet den Vorteil bei geringen Quantisierungsstufen ein eindeutiges Kriterium zu ermitteln. Das DBM erfüllt nicht das Additivitätsprinzip [vgl. CIE 75]. Dennoch ist die vorliegende Methode eine der in der wissenschaftlichen Welt am meisten diskutierten und vertretenen. [vgl. CIE 41; KHANH 2004; BODROGI ET AL. 1999; FAIRCHILD ET AL. 1996] Eine Spezialform stellt der Kleinschritt-Direktvergleich dar, in welchem beispielsweise zur Erhebung der spektralen Hellempfindlichkeit, die jeweiligen Teststimuli sehr ähnlich zum Referenzreiz gewählt werden, um vor allem chromatische Effekte zu vermeiden. Damit können Farbunterschiede direkt vergleichbarer Spektren gering gehalten werden und es liegt eine hohe Reproduzierbarkeit vor [vgl. ENDERS 1995]. Aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung beim DB-Match werden sowohl der chromatische Kanal als auch der achromatische Kanal bei der Signalwahrnehmung angesprochen. Beim heterochromatischen Direktvergleich (HBM) werden unterschiedliche monochrome Reize beim Abgleich verwendet. Oftmals erfolgt ein Abgleich auf eine breitbandige Referenz.

Minimal Distinct Border (MDB)

Ähnlich der DBM-Methode werden zwei aneinander grenzende Felder dargeboten, welche sich durch ihre empfundene Helligkeit oder die vorhandene spektrale Komposition voneinander unterscheiden. Abgleichkriterium ist nicht die Bewertung der Helligkeit beider Felder, sondern die Einstellung des Testfeldes zum Referenzfeld in der Art, dass die Trennkante gerade noch wahrnehmbar ist. Farblich gesättigtere Reize können dabei zwar ein größeres Hellempfinden auslösen, jedoch ist dieser Fakt für das eigentliche Untersuchungskriterium irrelevant [vgl. CIE 41]. Die MDB-Methode ist in Anbetracht der begrenzten räumlichen Auflösung des Auges bei kleinen Sehwinkeln nicht durchführbar. Dennoch wird das Prinzip der Additivität erfüllt [vgl. WAGNER ET AL. 1965; RAPHAEL 2010].

Flicker Photometry (FP)

Die Methode der Flimmerphotometrie nutzt die zeitempfindlichen Gegebenheiten des visuellen Systems aus. Es werden die Kanäle für die Farbsignalverarbeitung und die der Hellempfindung (chromatischer Beitrag ist ausgeschlossen) unterschiedlich angesprochen. Bei der FP werden dem Probanden zwei verschiedene Spektren dargeboten, die den gleichen retinalen Bereich in zeitlich alternierender Abfolge stimulieren. Zwischen 15-25Hz tritt eine additive Farbmischung beider Stimuli auf. Überdies wird die Frequenz beider Spektren so verändert, dass diese über der chromatischen Verschmelzungsfrequenz liegt und damit kein Farbempfinden auslösen kann.

Durch den schnelleren Luminanzkanal erscheinen schließlich Unterschiede im Hellempfinden als Flimmern, welches durch Variation der Strahldichte zu einem Flimmerminimum eingestellt werden kann. Oft werden monochrome Reize auf ein weißes Spektrum abgeglichen. Bei der Kleinschritt-FP hingegen wird, wie schon beim Kleinschritt-DBM, ein zur schmalbandigen Referenz benachbarter monochromerer Reiz abgeglichen, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Es findet somit ein paarweiser Vergleich von quasimonochromatischen Wellenlängen statt, die sich durch ein geringes $\Delta\lambda$ unterscheiden. Nach ENDERS (1995) ist es empfehlenswert, kurzwellig- und langwelligorientierte Paarreize abwechselnd zu betrachten. Auch die Flimmerphotometrie genügt durch Ausschluss des chromatischen Signalbetrags dem Additivitätsprinzip. Die genannte Methode bildet die Grundlage des derzeit gültigen photometrischen Systems. [vgl. CIE 41, HARTGE 1991, ENDERS 1995]

Einschränkungen nannte bereits KINNEY (1964). Eine problematische Umsetzung findet das genannte Verfahren bei großen Stimuli, insbesondere bei der Aktivierung zweier Rezeptorarten. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften der Signalverarbeitung in den Rezeptoren und den höheren retinalen Schichten ist eine Anwendung insbesondere im mesopischen Bereich nicht möglich. Zum einen ist die Einstellbarkeit des minimalen Flimmerns schwierig, da es nicht zu einer eindeutigen kritischen Frequenz kommen kann. Zum anderen ist vor allem bei spektralen Verteilungen am Rand der Hellempfindlichkeitsfunktion und entsprechend niedrigen Adaptationsleuchtdichten die nutzbare Strahldichte zu gering, um ein Flimmern exklusive einer chromatischen Beteiligung erzeugen zu können. Überdies ist die genannte Problematik der unterschiedlichen Signalverarbeitung über die Stäbchenkanäle Π und Π'_0 einzubeziehen (vgl. Kapitel 3.2). Das Verfahren zur **kritischen Frequenz** ist äquivalent zur FP, wobei ein monochromes Licht alternierend zu einem dunklen Testfeld dargeboten wird. Beide Reize werden i. d. R. mit identischen Präsentationszeiten versehen und das Einstellkriterium bildet der Punkt, an welchem der Wechsel zwischen „hell“ und „dunkel“ nicht mehr aufgelöst werden kann. [vgl. ENDERS 1995; CIE 41]

Minimal Motion (MM)

Anders als bei der MDB-Methode ist beim Verfahren des Minimal Motion nicht die räumliche Auflösung entscheidend, sondern die zeitliche. Ausschlaggebend ist die Veränderung der Wahrnehmungsgeschwindigkeit. Es wird ein farbiges Muster mit bestimmter Ortsfrequenz und konstanter Geschwindigkeit in einem Testfeld bewegt, bis der Wert der zu variierenden Strahldichte keine Wahrnehmung der Bewegung mehr ermöglicht. Übereinstimmend mit anderen auf der Wahrnehmungsgeschwindigkeit beruhenden Verfahren, ist für definierte Bedingungen die Additivität gegeben, jedoch unter Interaktion mehrerer Rezeptorarten nicht anwendbar. [vgl. ENDERS 1995; RAPHAEL 2010]

Successive Binocular Brightness Matching (SBBM)

Eine eigene Methode als Mischform des DBM und MBM stellt das SBBM²⁵ dar. Der Proband erhält auf gleicher retinaler Lokalisierung das Test- als auch das Referenzsignal. Anders als bei der Memory Brightness Matching Methode muss sich der Proband jedoch nicht bei jedem Ab-

²⁵ Stellt eine Abwandlung bezüglich der zu erhebenden Variable „Hellempfindung“ der im Original als Successive Binocular Viewing Technique bezeichneten Methode dar. [FAIRCHILD 1996]

gleichvorgang einen neuen Reiz einprägen (Memorization) und sich an diesen „erinnern“, um einen erfolgreichen Reizabgleich durchzuführen. Vielmehr ist eine räumlich identische Platzierung durch eine zeitliche Wiederholbarkeit der Referenz erweitert. Merkt der Proband eine Veränderung des verankerten Referenzstimulus bzw. wird er sich bei dessen Erinnerung unsicher, kann zu jeder Zeit die Referenz erneut dargeboten werden, um den Memorization-Prozess zu stützen. Somit ist ein genauere Abgleich als bei der MBM-Methode möglich und auch diverse Defizite der DBM-Methode (Kapitel 4.2.1) können umgangen werden. Eine Untersuchung zum Vergleich diverser Methoden kann FAIRCHILD (1996) entnommen werden.

Neben einigen wissenschaftlich relevanten Methoden sind jene für eine helligkeitsbasierte Forschung relevanten Vorgehensweisen erläutert. In Kapitel 4.2.1 wird ausführlich auf den Vergleich der für diese Arbeit wichtigsten Methoden eingegangen. Sehleistungsbasierte Methoden bedienen sich Hilfsgrößen wie Kontrastschwellen, Reaktionszeiten [SZALMAS ET AL. 2006], Abbau der Sehstoffkonzentration [SCHNAPF ET AL. 1987] und vielen mehr. Sie sind für die Untersuchung der Hellempfindung wenig hilfreich. Fortführend werden diese nicht weiter beachtet. Interessante Studien finden sich in Form der sehleistungsbasierten mesopischen Modelle der CIE 191 „Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance“ und deren zugrundeliegenden Forschungsarbeiten sowie in RAPHAEL (2010). Grundlegende Arbeiten zu Kontrastschwellen liegen in BLACKWELL (1946) vor. Zu spektralen Empfindlichkeitsfunktionen basierend auf Schwellenkontrasten mit Multi-Peak-Charakter sind die Arbeiten von BODROGI ET AL. (2003, 2005); KURTENBACH ET AL. (1999) und FULTON (2009) maßgebend.

KAPITEL 4

DETERMINATION VON FORSCHUNGSVARIABLEN

In Anbetracht der Vielzahl an Forschungsfragen ist eine genaue Abgrenzung der zu betrachtenden Variablen nötig. Gerade bei Abgleichen zur Hellempfindung ist mit einer erhöhten Varianz bei den Abgleichwerten zu rechnen. Dementsprechend ist eine genaue Bestimmung des Untersuchungsumfangs, -designs und der Variablenzusammenhänge durchzuführen.

Die Photometrie basiert auf der psychophysikalisch generierten Grundlage der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$. Neben dieser existiert eine große Anzahl weiterer Wichtungsfunktionen zur Überführung spektraler Informationen in photometrische Werte. Auch diese unterliegen untersuchungsbedingten Spezifikationen und Gültigkeiten, sind aber mitunter besser geeignet, um als Basis einer Beschreibung der mesopischen Leuchtdichte und damit Hellempfindung zu dienen. Diesbezüglich wird ein erweiterter Überblick bis hin zu rezeptorbasierten Empfindlichkeitsfunktionen gegeben. Es wird bewusst auf bisher nicht durch die CIE standardisierte Beschreibungen zurückgegriffen, welche aber in höchstem Maße von wissenschaftlicher Bedeutung und geforderter Exaktheit sind.

Weiterhin existieren diverse mathematische Formulierungen zur Beschreibung einer helligkeitsbasierten, mesopischen Leuchtdichte. Im Überblick werden diese dargestellt und gegenüber der durchgeführten Forschungsarbeit abgegrenzt. Dennoch sollen verschiedene Prinzipien der Herangehensweise beleuchtet werden, um eine spätere Umsetzungsmöglichkeit favorisieren zu können.

Bezüglich äußerst eng definierter Untersuchungen mit hoher praktischer Relevanz, wird der aktuelle Stand an Ergebnissen kritisch diskutiert.

Durch die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Grundlagen und Wirkzusammenhänge lassen sich theoretische und praxisrelevante Forschungsvariablen abgrenzen. Auf jenen beruht letztendlich die vorliegende empirische Arbeit und die anschließende statistische Auswertung und mathematische Beschreibung.

4.1 Bisherige Forschungsarbeiten zur Hellempfindung

4.1.1 Allgemeine Arbeiten zur spektralen Hellempfindung

Zur Überführung radiometrischer Daten in deren photometrische Entsprechung bedient man sich spektraler Empfindlichkeitsfunktionen. Neben den schon erwähnten photopischen und skotopischen Hellempfindlichkeitsfunktionen, welche auch im jeweiligen Adaptationsbereich als CIE-Normalbeobachter Erwähnung finden, existiert eine Vielzahl weiterer spektraler Bewertungsfunktionen. Diese sind zwar nicht von der internationalen Beleuchtungskommission empfohlen, teilweise jedoch als qualitativ hochwertiger zu bezeichnen und somit insbesondere in der Wissenschaft als exaktere Abbildung der Sehvorgänge des Menschen zu bewerten. Ob die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen nur den achromatischen Kanal oder/und auch den chromatischen Verarbeitungsweg berücksichtigen, ist in erster Linie der Erhebungsmethode geschuldet. Während sich die Wissenschaft über die Beschaffenheit der stäbchenorientierten Empfindlichkeitskurve einig ist, stellt sich das Feld der photopischen Forschung interessanter dar.

Für die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen im photopischen Bereich existieren, neben den schon in Kapitel 3.1 aufgeführten, eine Menge an Variationen. Diese betrachten zum Teil einzelne Variablen (Methoden, Sehwinkel, Exzentrizität, etc.) sehr genau und stellen Vergleiche zu anderen Datenerhebungen dar. Ein Überblick lässt sich HARTGE (1991) und ENDERS (1995) entnehmen. Sehr ausführlich fasst HAMM (1997) Forschungsergebnisse, aufgeteilt nach alleinigem Anteil des achromatischen Kanals und mit Beteiligung des chromatischen Kanals, zusammen. Erweiterung findet dies durch Studien, die eine variable Darbietungszeit betreffen. Insgesamt werden durch die drei Autoren mehr als 30 helligkeitsbasierte und 15 sehleistungsbasierte Bestimmungen der spektralen Empfindlichkeit verglichen. Oftmals bilden die zitierten Quellen jedoch nur eine sehr kleine Stichprobengröße von unter fünf Probanden ab.

Eine darüber hinaus zu erwähnende spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion stellt die $V_{10}(\lambda)$ -Kurve dar. Mit der Erkenntnis der Veränderungen bezüglich der Sehvorgänge unter zunehmender Exzentrizität und der daraus resultierenden Unzulänglichkeit $V(\lambda)$'s als größer 2° sehwinkelebasierte Funktion bestand die Absicht, eine Bewertungsfunktion für einen weiträumigeren retinalen Bereich festzulegen. Mittels Einführung des 10° Normspektralwertsystems durch die CIE 1964 bestand die Möglichkeit, die Normspektralwertfunktion $y_{10}(\lambda)$ auch für diese Anwendungsgebiete zu nutzen. Bis 2005 war die Nutzbarkeit zur Beschreibung der Hellempfindung für größere Sehwinkel von über 4° umstritten [vgl. WYSZECKI ET AL. 1992; CIE 41]. Die 1964 beschlossenen Normspektralwertfunktionen basieren auf der Methode der Colorimetry (Farbmischung), einer erweiterten Art der Flickerphotometrie, und sind somit konform zum Additivitätsprinzip. In der CIE 165 (2005) wird nach eingehender Forschungsarbeit $y_{10}(\lambda)$ angenommen und als $V_{10}(\lambda)$ zur Anwendung empfohlen. Einhergehend mit der Einführung ist bei Benutzung des photopischen 10° Normalbeobachters ein $K_{m,10} = 683,5991 \text{ lm/W}^{-1}$ anzuwenden.

Einen Schritt weiter gehen HALONEN und Kollegen. Sie prüften die Anwendbarkeit beider empfohlenen photopischen Normalbeobachter und kamen zu dem Schluss, dass im peripheren Bereich immer noch eine Unterbewertung kurzweiliger Strahlung vorhanden ist. Dies erfolgte mit der Durchführung eigener Untersuchungen zur spektralen Hellempfindlichkeit mittels Methode der Reaktionszeitbestimmung bei $L=10 \text{ cd/m}^2$ und $L=20 \text{ cd/m}^2$, bei binokularer fovealer Präsentation sowie bei 10° Exzentrizität. Es bestand das Ziel, eine genaue periphere Empfindlichkeitsfunktion zu erstellen. Als Teststimuli wurden den fünf Probanden, mit dem Durchschnittsalter von 29 Jahren, fünf LED mit Halbwertsbreiten von $\lambda=16\text{-}36 \text{ nm}$ und einer Stimulusgröße

von $0,29^\circ$ dargeboten. Das Ergebnis stellt eine periphere spektrale Empfindlichkeitsfunktion dar, welche auf der Linearkombination zwischen $V(\lambda)$ und $V_{10}(\lambda)$ beruht.

$$\begin{aligned} V_{per}(\lambda) &= V_{10}(\lambda) + k(V_{10}(\lambda) - V(\lambda)); \lambda = 380 \dots 556 \text{ nm} \\ V_{per}(\lambda) &= V_{10}(\lambda); \lambda = 557 \dots 800 \text{ nm} \end{aligned} \quad (\text{Gl.11})$$

Nach der zweiten Iteration wurde k auf 0,7684 festgelegt, um die Standardabweichung unter beiden Adaptationsleuchtdichten zu minimieren.

Die Unterteilung von $V_{per}(\lambda)$ mittels Transitionspunkt bei der Wellenlänge von 557 nm ist mit der Behauptung von WALD (1945) verbunden, wonach die peripheren Zapfen im Wellenlängenbereich von $\lambda=380-550$ nm kurzweilig empfindsamer sind als in der Fovea. Bisher gibt es keine Anhaltspunkte, wonach Rezeptoren unterschiedlicher retinaler Lokalisierung differenzierte Empfindlichkeiten aufweisen. WALD's Aussage ist eher auf die Dichte des Makulapigments und dessen spektrales Transmissionsverhalten zurückzuführen (vgl. Abbildung 4). [vgl. HALONEN ET AL. 2005]

Einen gänzlich neuen Ansatz verfolgten die Forscher um SHARPE (2005) und veröffentlichten eine „physiologisch relevante“ Hellempfindlichkeitsfunktion $V^*(\lambda)$. Hauptinnovationspunkt stellt die Verwendung einer Kombination von L- und M-Zapfenempfindlichkeiten dar. In verschiedenen Forschungsbereichen wird davon ausgegangen, dass die bestimmten Zapfenempfindlichkeitsfunktionen (cone fundamentals, CF) von SML sowie die darauf basierende spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion wissenschaftlich grundlegend und korrekt sind [vgl. KHANH 2009; SCHANDA 2010]. Im Vergleich der $V^*(\lambda)$ -Funktion zu konventionellen Hellempfindlichkeitsfunktionen lassen sich einige Vorteile herausgreifen [vgl. SHARPE 2005]:

- Basis bildet die Verwendung der Heterochromatischen Flimmerphotometrie bei 25Hz über den Wellenlängenbereich von 430-675 nm (Extrapolation der Daten auf $\lambda=390-830$ nm durch Verwendung der Zapfenempfindlichkeitsfunktionen (ZEF). [STOCKMAN ET AL. 2000]
- Untersucht wurden 40 normalsichtige, trainierte Probanden, welche nach vorhandenen Genotypen der L-Zapfen (Kapitel 2.1) betrachtet wurden und deren Verhältnis in der Untersuchung ($L_{ser}:L_{ala}=58:42$) dem in der Gesellschaft vorherrschendem stark ähnelt (56:44). Der Altersdurchschnitt beträgt 33 Jahre. Somit sind gerontologische Einflüsse ausgeschlossen und eine Vergleichbarkeit zu anderen Empfindlichkeitsfunktionen gegeben.
- Verwendung fand ein 2° Sehfeld, welches einem in der CIE geforderten photopischen Normalbeobachter entspricht und dem Additivitätsprinzip über einen weiten Intensitätsbereich der HFP folgen kann.
- Das Adaptationsumfeld (16° Sehfeld) entsprach dem Tageslichtweiß von D_{65} , welches allerdings mit einer Xenonlampe realisiert wurde (CCT=5586K, $x=0,330$, $y=0,3844$) und als Adaptationsleuchtdichte ca. 246 cd/m^2 ($3,0 \text{ log potopische Td}$) erzeugte. Begründung findet die Verwendung der hohen CCT, in der Erreichung eines möglichst niedrigen Zapfendesensibilisierungsfaktors von 1,16, um beide Zapfenarten gleichmäßig zu stimulieren (vgl. chromatische Adaptation). Als Referenzreiz diente eine Wellenlänge von 560 nm.

Während der Datenauswertung bestand vor allem die Schwierigkeit in der Bestimmung der separierten und durchschnittlichen Wichtungen der L- und M-Zapfen, definiert über deren Verhältnisse zu den L-Zapfensubtypen. Der Ausschluss von S-Zapfensignalen erfolgte durch den Einsatz hoher Frequenzen bei 25 Hz. Demzufolge ist eine Vergleichbarkeit zu ursprünglichen Auffassungen des Luminanzkanals gegeben. Weiterhin unterscheiden sich die Verhältnisse der L-Subtypen vorliegender Untersuchung nur marginal von jenen im Jahr 2000 bestimmten Zapfenempfindlichkeiten. Diesem Fakt folgend, muss keine gesonderte Wichtung α der Subtypen

vor Mittelwertbildung erfolgen und es ergibt sich aus Gleichung 12 vereinfachend die Berechnungsvorschrift 13. Es stellen $\bar{l}(\lambda)$ bzw. $\bar{m}(\lambda)$ die entsprechenden ZEF dar.

$$V^*(\lambda) = (\alpha_{ala} \cdot \bar{l}_{ala}(\lambda) + \alpha_{ser} \cdot \bar{l}_{ser}(\lambda)) + \bar{m}(\lambda) \quad (\text{Gl.12})$$

$$V^*(\lambda) = \alpha \cdot \bar{l}(\lambda) + \bar{m}(\lambda) \quad (\text{Gl.13})$$

Die Autoren beschreiben einen gefundenen kleinen Beitrag der S-Zapfen zur Hellempfindung von minus 0,35 %, wobei der Anteil an der Hellempfindlichkeitsfunktion statistisch nicht signifikant ist. SHARPE ET AL. fügen jedoch die Erweiterung hinzu, dass unter den verwendeten speziellen Versuchsbedingungen, insbesondere der Frequenzen von 25 Hz (S-Zapfenkanalfrequenzen 15-25 Hz), die $V^*(\lambda)$ -Funktion Gültigkeit besitzt, jedoch nicht für alle vorkommenden Bedingungen auf einen S-Zapfenbeitrag verzichten kann. In solchen Fällen ist eine Modifizierung vorzunehmen. Ein Einsatz für die visuelle Forschung per se ist aufgrund der einflussnehmenden Variablen wie Stimulusgröße, Exzentrizität etc. limitiert, für den praktischen Einsatz aber zu empfehlen. Die finale $V^*(\lambda)$ -Version entsteht, normalisiert auf eine Wellenlänge bei $\lambda_{\max}=555,5$ nm, nach der energetisch basierten Gleichung 14 und ist visualisiert in Abbildung 25. Deutlich ist eine erhöhte spektrale Empfindlichkeit ab $\lambda < 500$ nm gegenüber der korrigierten $V_M(\lambda)$ -Funktion zu erkennen.

$$V_e^*(\lambda) = [1,624340 \cdot \bar{l}_e(\lambda) + \bar{m}_e(\lambda)] / 2,5255989 \quad (\text{Gl.14})$$

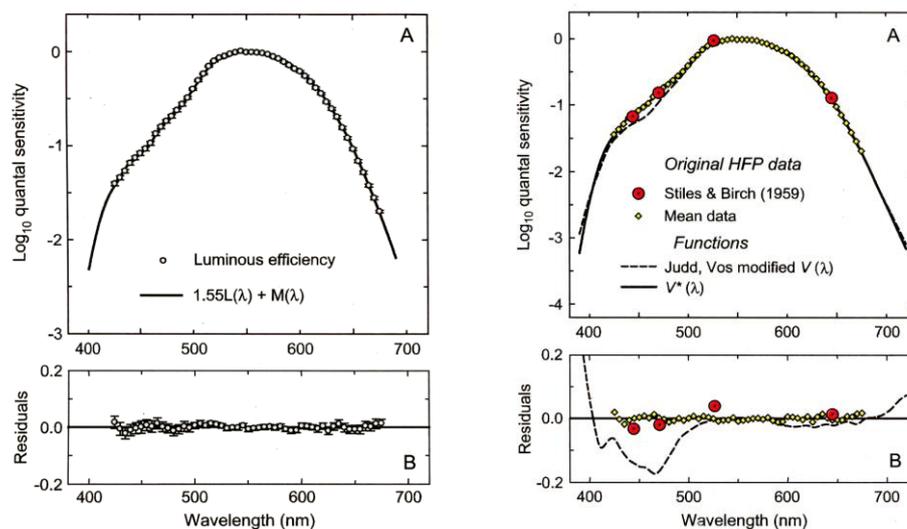


Abbildung 25: Entwicklung und Finalisierung der $V^*(\lambda)$ als physiologische Hellempfindungsfunktion (links: Originaldaten der 25 Hz heterochromatischen Flimmerphotometrie (HPF) aus 40 Probandenurteilen; rechts: Gegenüberstellung der finalen Version $V^*(\lambda)$ zu $V_M(\lambda)$ und den FP-Messungen von STILES & BURCH an vier Stützstellen; darunter: Abweichungen zwischen $V^*(\lambda)$ zu den gegenübergestellten Daten) [vgl. SHARPE ET AL. 2005]

Die zugrundeliegenden Zapfenempfindlichkeitsfunktionen wurden von STOCKMAN ET AL. 1999 für S-Zapfen und im Jahr 2000 für L- und M-Zapfen auf Basis der 10° Colour Matching Functions (CMF) nach STILES & BURCH (1959) ermittelt. Dabei kommt insbesondere eine Korrektur der Stäbchenbeteiligung zum Tragen. Der Vorteil an der Verwendung der ermittelten Colour Matching Functions ist, dass diese für 2° und 10° direkt gemessen wurden und nicht unnötigen photometrischen Prämissen unterliegen. STOCKMAN und Kollegen bestimmten aus Untersuchungen an rot-grün Dichromaten, blau Monochromaten als auch normalsichtigen Trichromaten die CMF-Wichtungsfaktoren zur Modellierung der eigentlichen Zapfenempfindlichkeitsfunktionen. Für eine Verwendung der 10° basierten Daten für ein 2° gültiges Sehfeld sind Konvertierungen unter Berücksichtigung der Makulapigmentdichte und der jeweiligen optischen Photopigmentdichte eingegangen. [vgl. STOCKMAN ET AL. 1999, 2000]

Eine allen Umfeldbedingungen gerecht werdende spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion gibt es bisher nicht. Inwieweit Simulationen von Einflussvariablen auf den visuellen Sehvorgang programmiert werden können und schließlich in sich jeweils verändernden Empfindlichkeitsfunktionen, die betrachtete Situation erfassend, resultieren, bleibt dem wissenschaftlichen und technischen Fortschritt geschuldet. Welche Einflussvariablen bis dato besonderer Beachtung unterliegen, zeigen folgende vergleichende Untersuchungen.

In Kapitel 3.5 wurde auf die Spezifika einzelner Methoden eingegangen. Diese haben einen direkten Einfluss auf die Gestalt bezüglich der jeweiligen spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen. Abbildung 26 verdeutlicht den Sachverhalt anhand einer Methodenauswahl und deren Gegenüberstellung. Insbesondere sind Unterschiede im lang- und kurzwelligem Bereich zu erkennen, welche hauptsächlich auf den in die Methoden einfließenden chromatischen Anteil zur Hellempfindung zurückgeht. Bedingte Variationen innerhalb der verglichenen Studien können nicht ausgeschlossen werden.

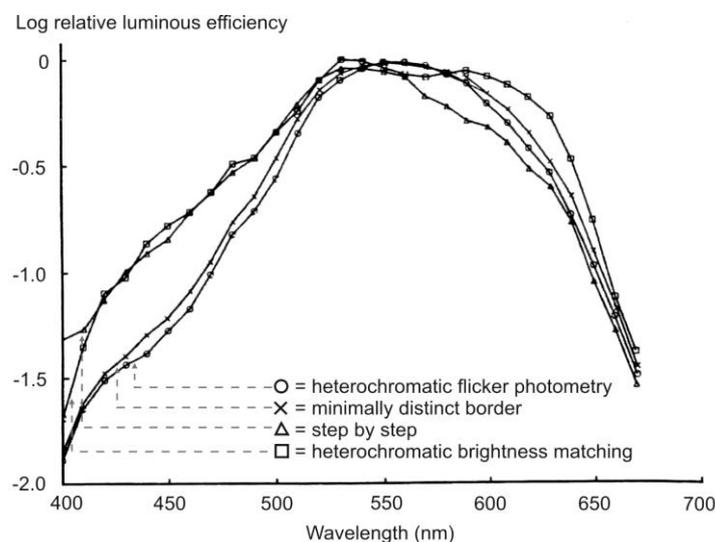


Abbildung 26: Gegenüberstellung spektraler Hellempfindlichkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Erhebungsmethode [entnommen und mod. aus BOYCE 2003, im Original nach COMERFORD & KAISER 1975]

Einen direkten Vergleich der Methoden des HBM und der HFP anhand von drei Probanden über den mesopischen Bereich von 0,03-100 Troland veröffentlichten VIENOT & CHIRON (1992). Zur Präsentation der Stimuli diente ein 10° umfassendes Referenz- und Testfeld sowie ein dieses Umgebendes 10° - 30° großes Adaptationsumfeld mit dimmbarem, peripherem Feld. Diese Stimuli setzten sich aus drei Wellenlängen (445; 560; 630 nm) mit einer Halbwertsbreite von je $\lambda_{\text{HWB}}=16$ nm zusammen. Als Referenz diente ein Halogenstrahler mit einer ungefähren Farbtemperatur von $T_n=3800$ K. Insgesamt fanden drei bis vier Wiederholungen für jede Wellenlänge statt, wobei je Versuch die Leuchtdichte um 0,5 logarithmische Einheiten gesenkt wurde. In den Ergebnissen bezüglich der kurzwelligen Wellenlänge von $\lambda=445$ nm treten zwischen den Methoden erhebliche Unterschiede auf. Zwischen den Referenzbeleuchtungsstärken von 0,3-10 Td war es den Probanden nicht möglich, eine minimale Flimmerfrequenz einzustellen. Gleiches ist bei $\lambda=630$ nm im Bereich von ca. 0,1-3 Td der Fall, während mittels HBM ein Abgleich stetig möglich war. Unter diesen Konditionen zeigen die interpolierten Daten teilweise einen entgegengesetzten Verlauf. Bezüglich des kurzwelligen Stimulus ist ab bei einem Niveau kleiner als 3 Td ein deutlicher Purkinje-Effekt festzustellen. Hinsichtlich der mittleren Wellenlänge lässt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den verglichenen Methoden feststellen. Interessant stellt sich der Schluss einer Stäbchen-Zapfen Interaktion bei kurzwelligen Anteilen innerhalb von kleinen Leuchtdichten unter der HFP-Methode dar. Die beteiligten Rezeptoren sind die

Stäbchen und die S-Zapfen. Dies stellt sich konträr zur photopisch basierten Auffassung dar, dass die kurzwellig empfindlichen Zapfen keinen oder nur einen sehr kleinen Beitrag zur Hellempfindung leisten. Die vorliegende Studie belegt, dass unter niedrigen Frequenzen (5-9 Hz) sowie bei niedrigen, im mesopischen Bereich liegenden Leuchtdichten und kurzen Wellenlängen ein S-Zapfenbeitrag für die Hellempfindung vorliegt.[vgl. VIENOT ET AL. 1992 ; BOYNTON 1980] Zu ähnlichen Erkenntnissen kommt STOCKMAN ET AL., die einen S-Zapfenbeitrag auch bei hohen Frequenzen sehen, dieser jedoch durch die L- und M- Zapfenanteile zum Chrominanz- und Luminanzsignal maskiert wird. [vgl. STOCKMAN ET AL. 1991]

Die meisten Untersuchungen zur spektralen Hellempfindlichkeit gehen von einem neutralweißen Umfeld beziehungsweise adaptationsbestimmenden Stimulus aus. Je nachdem, welche Art von Referenz benutzt wird, ist ein chromatischer Adaptationseinfluss zu beachten. Untersuchungen von HURVICH & JAMSON belegen eine Abhängigkeit des Verlaufs der spektralen Hellempfindlichkeit bezüglich des gewählten Adaptationsspektrums. Anhand zweier Probanden wurden bei 10 mL (ca. 31 cd/m²) spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen des rechten Auges evaluiert. Dabei kam die Methode des Direktvergleichs (geteiltes Feld des Sehzeichens 1°, Umfeld 37°) zum Einsatz, wobei die schmalbandigen Adaptationshintergründe zwischen weiß, blau, grün, gelb und rot wechselten. Generell scheint es so, dass sich entgegengesetzte Mechanismen ausbilden. Während eine Verschiebung der spektralen Empfindlichkeitsmaxima zu längeren Wellenlängen bei einem blauen und grünen Adaptationsumfeld, im Vergleich zu einem neutralen Hintergrund, stattfindet, verhält es sich für gelbe und rote Adaptationsfelder umgekehrt. Weiterhin ist zu bemerken, dass die jeweiligen Effekte separiert bei jeweils nur einem Probanden auftraten. Aufgrund der vorliegenden Probandenmenge ist ein entsprechendes Ergebnis jedoch kritisch zu betrachten. Inwieweit chromatische Adaptationseffekte von breitbandigen Lichtquellen einen Einfluss auf eine Hellempfindlichkeitsfunktion haben, bleibt somit zu erforschen. [vgl. HURVICH ET AL. 1953A,B]

Eine direkte, auf die retinale Struktur zurückzuführende Einflussnahme auf das spektrale Hellempfinden bildet nicht nur die retinale Position eines Stimulus, sondern auch die räumliche Ausdehnung desselben. Für sehr kleine und foveal dargebotene Reize wurden von BEDFORD & WYSZECKI Studien an vier Probanden durchgeführt. Mittels Direktvergleichsmethode wurden Feldgrößen von 1°; 12' und 1,5' zwischen 7 Td (0,55 cd/m²) und 11000 Td (875,01 cd/m²) untersucht²⁶. Der Abgleich erfolgte zwischen einem Xenonspektrum und präsentierten monochromen Wellenlängen im Abstand von 10-20 nm [400:700 nm] zueinander. Es erfolgte eine zwei- bis dreimalige Wiederholung aller Abgleichvorgänge je Proband. Anzumerken ist, dass durch die gewählten Feldgrößen ein Stäbcheneinfluss ausgeschlossen werden kann, somit nur das Verhalten der Zapfen von Bedeutung ist. Generell kann die Aussage getroffen werden, dass sich die Hellempfindlichkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Feldgröße und Leuchtdichteadaptationsniveau je Proband kaum unterscheiden. Interindividuelle Differenzen sind dessen ungeachtet ungleich größer. Die Autoren kommen weiterhin zu der Erkenntnis, dass die Unterschiede im Bereich der kurzwelligen Empfindlichkeit größer sind, als im rot erscheinenden Spektralabschnitt. Äußerst interessant stellt sich die Entwicklung eines inversen Purkinje-Effekts dar. Mit abnehmendem Reizlevel nimmt die kurzwellige Empfindlichkeit ab, die langwellige andererseits zu (Abbildung 27A). Der gesamte Sachverhalt ist in Abbildung 27 abgebildet.

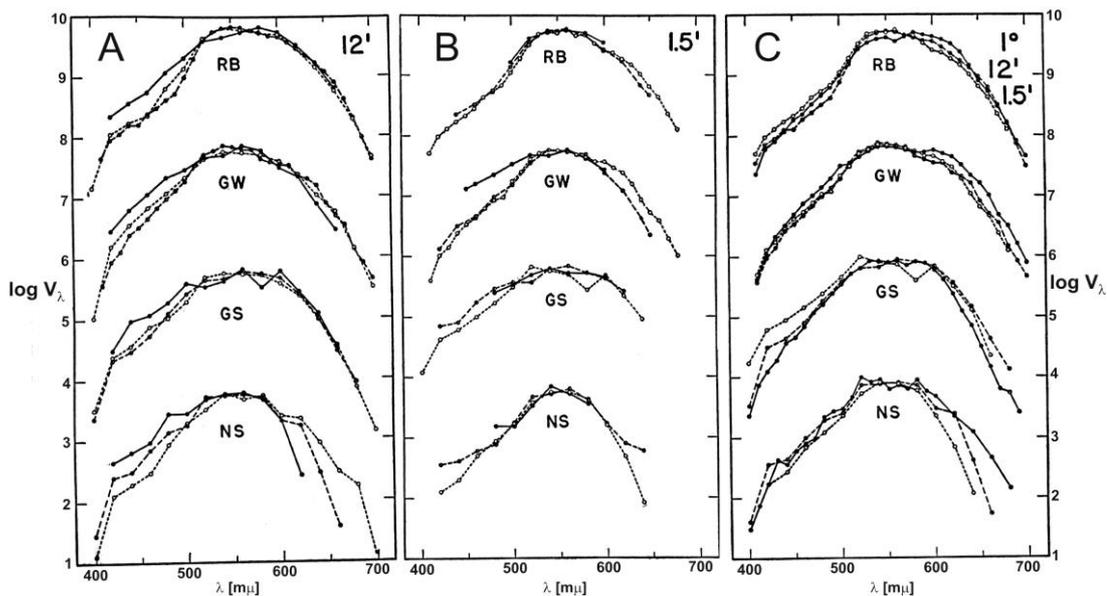


Abbildung 27: Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen bei kleinen fovealen Feldgrößen und retinaler Beleuchtungsstärke (Kurvenverläufe um 2 log Einheiten versetzt für vier Probanden dargestellt. A: Feldgröße 12' bei 500 Td (durchgezogene Linie), 50 Td (gestrichelte Linie), 7 Td (gepunktete Linie); B: Feldgröße von 1,5' bei 11000 Td (durchgezogene Linie), 1500 Td (gestrichelte Linie), 150 Td (gepunktete Linie); C: Gegenüberstellung der Feldgrößen 1° (durchgezogene Linie) und 50 Td, 12' (gestrichelte Linie) und 50 Td, 1,5' (gepunktete Linie) und 150 Td) [BEDFORD ET AL. 1958]

Deutlich ist bei der Stimulusgröße von 12' eine Zunahme der „rot“-Empfindlichkeit gegenüber dem „blauen“ Part mit Abnahme der Adaptationsleuchtdichte zu erkennen. Vergleicht man diesen Effekt mit der kleinsten Feldgröße von 1,5' ist das Phänomen nur schwer nachzuvollziehen. Begründet ist dies zum einen mit fehlenden Daten für 11000 Troland, zum anderen sind in besagten retinalen Bereichen nur sehr wenige S-Zapfen in geringer Rezeptordichte vertreten. Zweite Kernaussage der Forschungsarbeit ist jene, dass mit Abnahme der Stimulusausdehnung bei annähernd gleichem Adaptationslevel wiederum die kurzwellig spektrale Empfindlichkeit relativ zur langwelligen Empfindlichkeit steigt (Abbildung 27C). [vgl. BEDFORD 1958]

Zusammenfassend sind zwei Mechanismen zu beobachten, welche den kurzwelligen Empfindlichkeitsanstieg in der stäbchenfreien Retina beeinflussen können - die Variation der Feldgröße und eine Veränderung der Reizlevel bis in photopische Bereiche. Dies spricht für eine Sonderrolle der evolutionstechnisch ältesten „blau“-Rezeptoren.

Weitere Studien unter Verwendung größerer Feldgrößen von 3°, 9,5° und 64° führten KOKOSCHKA & ADRIAN Anfang der 90er Jahre durch. Zielsetzung dieser Untersuchung war es, spektrale Empfindlichkeitsfunktionen in Abhängigkeit variabler Feldgrößen und Adaptationsbedingungen, insbesondere im mesopischen Bereich liegend, durch die Verwendung des Direktvergleichs zu generieren. Als Referenz für die Abgleiche dreier Probanden diente eine Wellenlänge von $\lambda=530$ nm und Adaptationszustände von $L=0,001-10$ cd/m² im Abstand von je einer Zehnerpotenz. Durch den Vergleich der gewonnenen Daten ist eine eindeutige Abhängigkeit der maximalen Wellenlängen einzelner spektraler Empfindlichkeitsfunktionen je Feldgrößen vom Adaptationsniveau zu erkennen. Es ist ein Auseinanderdriften der vorerst übereinanderliegenden

²⁶ Bei dieser Untersuchung wurde nur der Stimulus von 1° als horizontal zweigeteiltes Feld dargeboten. Bei 12' Feldgröße befanden sich die Mittelpunkte der Stimulirkreisflächen 24' auseinander, bei 1,5' herrschte eine Entfernung von 40'.

spektralen Maxima bei $L=10 \text{ cd/m}^2$ mit Absenkung der Adaptationsleuchtdichte gegeben. Deutlich geht aus den Ergebnissen die Verlagerung des Zapfensehens zum Stäbchensehen hervor. Diesbezüglich unterscheiden sich in besonderen Maße die spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen von 3° bis 64° im kurzwelligen Bereich. [vgl. KOKOSCHKA ET AL. 1985]

Während eine gute Übereinstimmung der Empfindlichkeitsfunktionen aller Feldgrößen und eines Adaptationsniveaus aus BEDFORD ET AL. ersichtlich ist, kann dies bezüglich der vorliegenden Untersuchung von KOKOSCHKA ET AL. als nicht gegeben betrachtet werden.

Eine differenzierte Hellempfindung für einen statischen Zustand der Adaptation ist in Abhängigkeit der stimulierten Netzhautgröße zu vermuten. Dies ist in Abbildung 28 an drei Adaptationszuständen visualisiert. Beachtung finden sollte vor allem der Unterschied von $V(\lambda)$ entsprechend der Empfindlichkeitsunterschiede bei Wellenlängen von unter 550 nm. Als Ursache für die Veränderung kann wieder die Dichte des Makulapigments gesehen werden sowie die Veränderung der retinalen Rezeptorstruktur als auch deren nachgeschaltete Verarbeitungskanäle. Die Veränderung im langwelligen Bereich ist vermutlich auf eine Veränderung des Stäbchen-Zapfenverhältnisses in Abhängigkeit von der retinal stimulierten Fläche zurückzuführen.

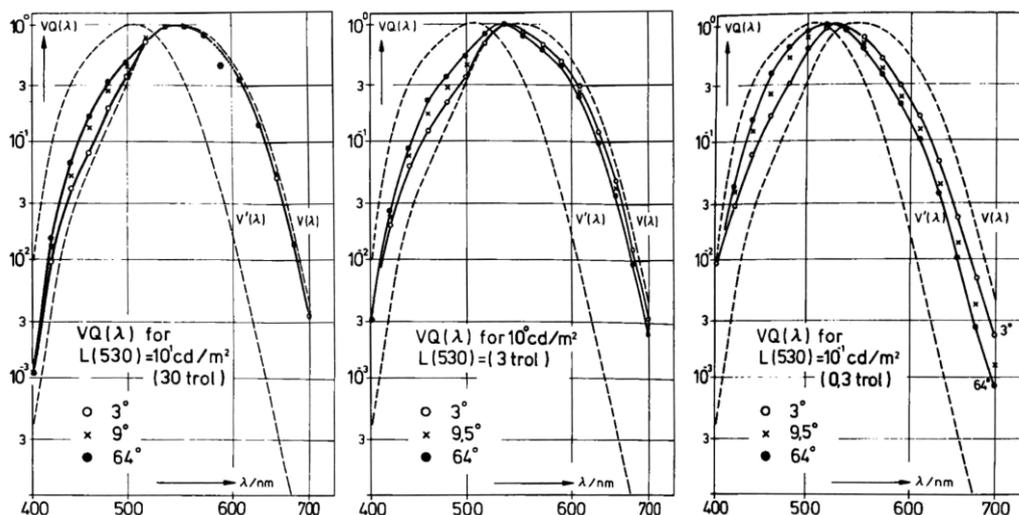


Abbildung 28: Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen bei großen Feldgrößen in Abhängigkeit von der Adaptationsleuchtdichte im mesopischen Bereich [KOKOSCHKA ET AL. 1985]

$VQ(\lambda)$ beschreibt die äquivalente Vergleichsstrahlung, welche notwendig ist, damit ein gleiches Hellempfinden in Bezug auf die Vergleichsstrahlung bei 530 nm erzeugt wird. Dargestellt ist eine Auswahl von feldgrößenabhängigen Hellempfindungsfunktionen bei $L=10; 1; 0,1 \text{ cd/m}^2$.

4.1.2 Helligkeitsbasierte und ergänzende Modelle der „mesopischen“ Photometrie

In den letzten Jahrzehnten wurde sich intensiv mit der Erstellung von „ergänzenden Modellen der Photometrie“ auseinandergesetzt, um eine Beschreibung der Helligkeit und der Sehleistung im mesopischen Bereich zu ermöglichen und für eine allgemeine Verwendung nutzbar zu machen. Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie die existierenden mesopischen Modelle für eine Beschreibung der Hellempfindung zu bewerten sind. Anhand der Vielzahl vorgeschlagener Berechnungsmodelle zur Ermittlung einer mesopischen oder auch systemäquivalenten Leuchtdichte, welche eine Hellempfindung abbilden soll, ist die Mannigfaltigkeit der betrachteten Variablen und Forschungsansätze ersichtlich. Wie schon in vorangegangenen Kapiteln angesprochen, lassen sich helligkeitsbasierte und sehleistungsbasierte Ansätze unterscheiden. Diesbezüglich

wird von der Auffassung ausgegangen, dass die Hellempfindung die Grundgröße für die meisten visuellen Vorgänge darstellt. Mittels der zur Verfügung stehenden Messgeräte besteht die Möglichkeit, Leuchtdichten zu messen und darauf aufbauend eine Berechnung von Kontrasten und Schwellen durchzuführen. Hervorgerufen wird jedoch in jedem Fall eine Hellempfindung, welche nicht unbedingt mit der Messgröße korrelieren muss. Auch für sehleistungsbasierte Modelle ist somit die Hellempfindung, ergo die äquivalente Leuchtdichte, mit ausschlaggebend (Kapitel 3.4). REA ET AL. (2004) schränken die Aussagekraft sehleistungsbasierter Modelle vor allem auf fahrerspezifische und objekt-detektionsbasierte Anwendungen ein. Helligkeitsbasierte Modelle sollen dagegen eher die Grundlage für praktische Applikationen darstellen.

Generell lassen sich die betrachteten helligkeitsbasierten Modelle in zwei Klassen einordnen, welche sich hinsichtlich der Sehzeichengrößen von 2° und 10° auszeichnen. In beiden Klassen lassen sich wiederum Subtypen finden. Alle 2° -Modelle, außer jenem von NAKANO, bilden eher Berechnungsmodelle zur Korrektur photopischer Messwerte in Bezug auf den chromatischen Einfluss auf das Hellempfinden ab. Dies wird am Fakt deutlich, dass in keiner Berechnungsvorschrift achromatische Anteile der Stäbchen eingehen. Eine Unterteilung der 10° -Modelle lässt sich prinzipiell in Zwei- und Vierkomponentensysteme vornehmen. Hierbei bilden das KOKOSCHKA-BODMANN- und TREZONA-Modell die Vierkomponentensysteme ab. Die Modelle im Allgemeinen zeichnen sich entweder durch rein mathematische oder geometrisch-mathematische Ansätze aus. Alle Systeme sollen nach CIE 141 die Relativhelligkeit von Lichtern im Gesamtbereich der visuellen Empfindlichkeit bewerten können. Einen Überblick über helligkeitsbasierte Modelle und deren Haupteigenschaften bietet Tabelle 6. Für die genaue Umsetzung bei der Berechnung sei auf die CIE 89, CIE 141, KÖHLER (2006) und auf REA ET AL. (2004) verwiesen.

In Anbetracht der vorliegenden Anzahl von Modellen zur Beschreibung der Hellempfindung über eine systemäquivalente Leuchtdichte im mesopischen Bereich ist die Entscheidung nach dem zu empfehlenden zu fällen. Hierzu wurde durch die Internationale Beleuchtungskommission ein zweistufiges Verfahren eingeführt. In der ersten Phase erfolgte eine Zusammenstellung veröffentlichter Untersuchungen, welche mittels heterochromatischem Direktvergleich und mehr als einem Probanden durchgeführt wurden. Eine Inkompatibilität von Daten zu gegenwärtigen farbmetrischen und photometrischen CIE-Konventionen führte zum Ausschluss. Insgesamt standen zehn Studien zur Verfügung, um aus deren Daten mittels der in Tabelle 6 angegebenen Modelle systemäquivalente Leuchtdichten zu berechnen und mit den Probandendaten gleicher Untersuchung zu vergleichen. Als Ergebnis sind die Residuen, bestehend aus den RMSE's (Root Mean Square Error), genannter Studien verglichen worden. Obwohl auch bei den Validatoren der zu prüfenden Modelle unterschiedliche Untersuchungsdesigns vorlagen, kommt die CIE zum Schluss, dass die Ergebnisse der Überprüfung stark von dem in dieser Untersuchung angesetzten Testdesign abhängt. Weiter wird für die 10° -Systeme geäußert: „Just as with the 2° systems, the present testing did not find any one system better able to make the best brightness perception for all test data sets. However, all the systems showed somewhat better brightness perception than the CIE photometric quantities Y_{10} and L' [...]“ [vgl. CIE141]

In Vorbereitung auf einen CIE Workshop (1991) fand eine Referenzdatenzusammenstellung statt. Ein einheitliches Datenpaket wurde an sechs Forschungsgruppen versandt. 76 Probanden nahmen an einer erneuten Untersuchung dieser Daten anhand der DBM-Methode, einer gegebenen Feldgröße von 2° & 10° , bestimmten Referenz- und Teststimuli sowie bei Beleuchtungsstärken zwischen $E=0,3-1000$ lx teil. Am Urteil aus erster Phase änderte sich jedoch nichts. „Because the data sets available for such quantities tests do not agree well among themselves, it has not been possible to rank the purposed systems according their agreement with experimental data.“ [CIE 141]

Das getroffene Urteil scheint wenig verblüffend hinsichtlich der in den Originaluntersuchungen genutzten differierenden spektralen Stimuli sowie der Verwendung von Referenzen unterschiedlicher Wellenlänge und der nachträglichen Ergebniskonvertierung ohne psychophysikalische Validierung. Erweiterung findet die oben genannte Zusammenfassung damit, dass ein Komitee zukünftig Daten sammeln solle und diese als Basis zur Empfehlung eines Photometrischen Systems bezüglich der Hellempfindung dienen könnten. [vgl. CIE 141]

Modell	Feldgröße	Methode	Stimuli		L_{ad}	Eingabe	Bemerkung
			Referenz (CCT)	Test			
NAKANO (1992)	2°	DBM	Xenon $x=0,327$ $y=0,345$ *(D65)			L, L', x, y	2 Probanden
PALMER I (1968)	5°, 10°, 15°, 45° horizontal geteiltes Feld; 20° weißes Umfeld	HBM	Wolfram- lampe, (2042K)	mono- chro- matisch, breitband	3,16*10 ⁻⁴ - 3*10 ⁻¹ cd/m ² ; Schritte zu 0,5 log Ein- heiten	L_{10}, L'	3 bzw. 16 unterschiedliche Probanden; Variable $M_{10}=0,04$ cd/m ² , $M_{15}=0,06$ cd/m ²
PASLMER II (1981)						L_{10}, L'	Variable $M_{10}=0,06$ cd/m ² , $M_{15}=0,08$ cd/m ²
SAGAWA-TAKEICHI (1983)	10°	HBM	570nm	400- 700nm; 10nm Schritte	0,01-100Td; Schritte zu 0,5 log Ein- heiten	$L_{10}, L', x_{10}, y_{10}$	24 Probanden, mathe- matisch-graphisch, 3mm Pupille, differen- ziert zw. nicht- & mo- nochromatisch
NAKANO- IKEDA (1992)	10° vertikal geteiltes Feld	HBM	Xenon $x=0,327$ $y=0,345$ *(D65)	4 Wellen- läng- enpaare	0,01-100Td; Schritte zu 1log Einheit	$L_{10}, L', x_{10}, y_{10}$	2 Probanden; 7mm Pupille, Vergleich von jedem Paar mit je- dem anderen
KOKOSCHKA- BODMANN (1975)	10° (3°, 9,5°; 64°)	HBM	530nm	400- 700nm	0,003-30Td; Schritte zu 1log Einheit	$L_{10}, L', X_{10}, Y_{10}, Z_{10}$	3 Probanden; L_{eq} definiert bei $T=2042K$ Platin; Itera- tionsbasiert
TREZONA (1987)	10°	HBM	588nm	41 mono- chro- matisch, breitband	2 bis -2 ra- diometrische Troland	$L_{10}, L', X_{10}, Y_{10}, Z_{10}$	9 Probanden; Konvertierungen in ra- diometrische, photomet- rische Troland

Tabelle 6: Übersicht helligkeitsbasierter ergänzender Modelle der Photometrie (DBM: Direktvergleich (Direct Brightness Matching); HBM: Heterochromatischer Direktvergleich (Heterochromatic Brightness Matching); x,y: Normspektalwertanteile; X,Y,Z: Normspektalwerte; L:Leuchtdichte; L': skotopische Leuchtdichte; T: Farbtemperatur; CCT: ähnlichste Farbtemperatur (Correlated Colour Temperature); Indizes geben den zu verwendenden CIE Normalbeobachter an; *:Angabe in der CIE141) [vgl. CIE89; CIE141; KÖHLER 2006; REA ET AL. 2004; ALFTERDINCK 2006; RAPHAEL 2010]

Zu einem ähnlichen Urteil, dass keines der Verfahren als Bestes empfohlen werden kann, kommt auch KHANH, welcher die Arbeiten von PALMER, NAKANO und KOKOSCHKA anhand eigener Daten prüfte. In einer späteren Arbeit von KÖHLER zur Beurteilung der Helligkeit von Scheinwerfern anhand von Probandenversuchen kann keines der Systeme über eine hinreichend hohe Korrelation mit den Versuchsergebnissen als empfehlbar klassifiziert werden. [vgl. KHANH 2005; KÖHLER 2008] Fest steht, dass der Abgleich spektraler Strahldichten auf eine gleiche Hellempfindung für ungeübte Probanden als sehr schwierig anzusehen ist. Verschärft wird dies

durch ein differenziertes Versuchsdesign oder versuchstechnische Ungleichheiten in der Abgleichsinstruktion, beispielsweise des Abgleichskriteriums und der Abgleichregion. Naheliegenderweise ist mit einer erheblichen Varianz der interindividuellen Daten zu rechnen. Modelle mit geringem Stichprobenumfang sind diesbezüglich als wenig repräsentativ einzustufen. Zu den betrachteten Modellen ist abschließend festzuhalten, dass es sich trotz deren Komplexität um stark vereinfachende Beschreibungen des Sehvorgangs handelt.

Seit Veröffentlichung der CIE 141 sind weitere Versuche unternommen worden, ein beschreibendes Modell für die Photometrie aller Wahrnehmungsbereiche aufzustellen. Diesbezüglich veröffentlichte SAGAWA (2006) ein System, welches bei allen Leuchtdichteadaptationsleveln, auch im mesopischen Bereich, die Hellempfindung wiedergeben soll. Basis ist die äquivalente Leuchtdichte als Maßzahl des Helligkeitsdirektabgleichs (DBM) unter Einfluss des Purkinje-Effekts und des Helmholtz-Kohlrausch-Effekts. Ausgangspunkt für die Modellierung bilden die Signalverarbeitungsprinzipien aus Abbildung 11. Es gehen zwei Wichtungsfaktoren in die Berechnung ein. Dies ist a für die Beschreibung des achromatischen Anteils des Luminanzsignals der Zapfen und respektive $1-a$ als Stäbchenanteil. Der chromatische Luminanzbeitrag der Zapfen a_c , welcher im Helmholtz-Kohlrausch-Effekt begründet ist, bildet einen unabhängigen Faktor. Anhand dieses Prinzips lässt sich die ansteigende chromatische Beteiligung in Abhängigkeit höherer Leuchtdichten besser abbilden. Für die Zielsetzung der Berechnung einer äquivalenten Leuchtdichte bedarf es somit der Bestimmung von drei Koeffizienten. Da die Adaptation als Grundlage für die Rezeptoraktivitäten und der folgenden Sehprozesse gesehen werden kann, ist festzulegen, ob der Adaptationskoeffizient als Funktion der Stimulusleuchtdichte betrachtet wird, oder als Funktion der äquivalenten Leuchtdichte. SAGAWA präferiert den leuchtdichte-basierten Ansatz und folgt damit den Erkenntnissen von PALMER'S zweitem System. Einen Überblick über das von SAGAWA dem TC 1-37 vorgelegte System gibt Abbildung 29.

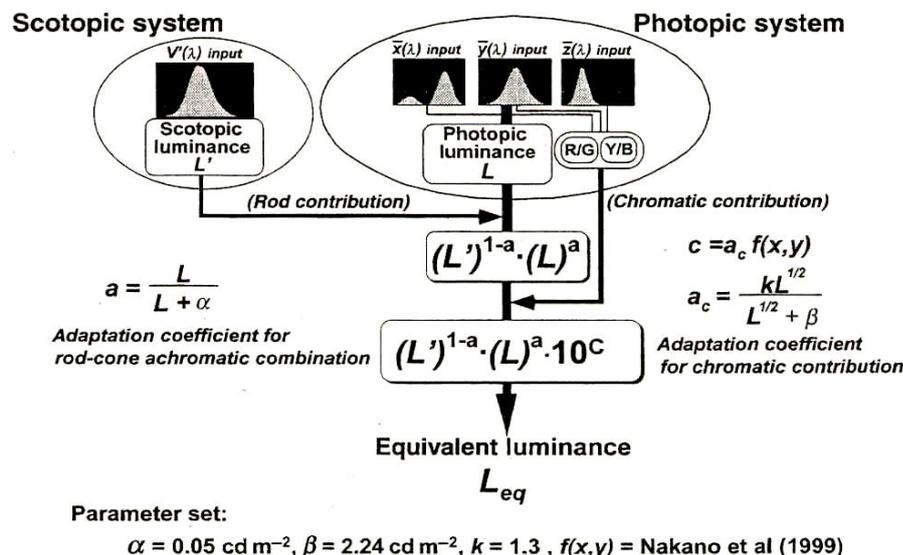


Abbildung 29: SAGAWAs vorgeschlagenes System zur ergänzenden Photometrie [SAGAWA 2006]

Die äquivalente Leuchtdichte berechnet sich nach gezeigtem Schema aus einer koeffizientenbehafteten Multiplikation der skotopischen und photopischen Leuchtdichte sowie einem chromatischen Beitrag. Während die Parameter α , β und k als konstant angesehen werden können, ist der chromatische Beitrag in Abhängigkeit der Normspektralwertanteile x , y zu ermitteln. Nach einer durch NAKANO (1999) beschriebenen Gleichung (Gl. 15) ist dies für einen 2° Normalbeobachter gewährleistet. Eine Erweiterung auf einen 10° Normalbeobachter ist möglich, jedoch ist die Abhängigkeit der Feldgröße auf den chromatischen Einfluss noch nicht vollständig erforscht.

$$f(x, y) = 0,5 \log(-0,0054 + 0,21x + 0,77y + 1,44x^2 - 2,97xy + 1,59y^2 - 2,11zy^2) - \log y \quad (\text{Gl.15})$$

Eine Überprüfung der Systemannahme erfolgte anhand des DBM von 20 Testfarben innerhalb eines Adaptationsbereichs von 0,01-100 Td mit einem Stichprobenumfang von 20 Probanden. [vgl. SAGAWA 2006; 2007]

Einen sehr interessanten und gänzlich anderen Ansatz verfolgten TOPALIS ET AL. (2010). Anhand von 15 Probanden (20-22 Jahre) wurde mit je fünf Abgleichen das Hellempfinden im mesopischen Bereich mittels des Farbmischverfahrens (Colorimetry) eines zweigeteilten 10° Feldes ermittelt. Ziel des Farbmischverfahrens, welchem nach CIE 41 Additivitätsgültigkeit bescheinigt wird, ist es, mittels Mischung von monochromen Primärvalenzen (*RGB*), diese auf einen Stimulus Q abzugleichen. Die Primärvalenzen der Untersuchung untergliederten sich in R=641 nm, G=560 nm und B=441 nm. Die fünf monochromen Stimuli bestanden aus $Q_{1...5}=420...580$ nm, während sich die vier Adaptationslevel in Form der emittierten Strahlung von $M_e = 270 \cdot 10^{-5}$ bis $0,3 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ erstreckten. Im Ergebnis steht eine mathematische Beschreibung der empirischen Daten durch eine gewichtete Linearkombination von $V_{10}(\lambda)$ und $V'(\lambda)$. Für die Anwendung der Berechnungsvorschrift ist der energetisch basierte Koeffizient a_E aus einer weiteren Reihe von wellenlängenabhängigen Konstanten bezüglich der Stimuli Q zu ermitteln. Weiterhin geht das skotopische (S) zu photopische (P) Verhältnis in die finalisierte Gleichung 16 mit ein. M symbolisiert hierbei die mesopische Leuchtdichte. Gültigkeitsgrenzen werden mit einem S/P-Bereich von 0,3 bis 3 und einem Leuchtdichtebereich von 0,001 cd/m² bis 3 cd/m² angegeben. [TOPALIS ET AL. 2010]

$$M = a_E \cdot P + (1 - a_E) \cdot S = a_E \cdot P + (1 - a_E) \cdot \left(\frac{S}{P} \right) \cdot P \quad (\text{Gl.16})$$

Auch wenn der energetisch basierte Ansatz zu begrüßen ist, sind kritische Anmerkungen bezüglich der durchgeführten Untersuchung und deren Annahmen anzubringen. So wird beispielsweise bei der Berechnung der skotopischen Anteile ein $K'_m=1720 \text{ lm/W}$ verwendet, statt der laut Definition üblichen 1700 lm/W (bzw. 1699 lm/W). Während des Einstellvorgangs der Primäre auf den Stimulus unterlagen die Probanden keinen zeitlichen Restriktionen. Es erfolgte zwischen den Abgleichen keine Readaptation im eigentlichen Sinne. Des Weiteren erfolgte von nur acht der 15 Probanden ein Abgleich aller Strahlungslevel zum 520 nm Teststimulus. Eine starke Variation der Probanden und Untersuchungskriterien ist bei den verbleibenden Testreihen zu finden. Eine Angabe statistischer Werte zur Beurteilung der Untersuchungsgüte fehlt bis auf den Abgleich bei 520 nm gänzlich. Für die Ergebnisinterpretation wird bei der Wellenlänge von 520 nm das Maß des Variationskoeffizienten (Coefficient of Variation: CV) herangezogen. Es wird eine Zunahme des CV's für alle Primäre (*RGB*) mit Abnahme der emittierten Strahlung prognostiziert. Eine theoretische Erklärung wird mit der Vergrößerung der McAdams-Ellipsen und deren Unsicherheiten sowie mit einer abnehmenden Präzision des Messgeräts bei kleinen Messgrößen gegeben. Ein Vergleich der CV's über die Intensitätslevel und deren Interpretation scheint jedoch unzulässig, da zur Berechnung neben der Standardabweichung der Mittelwert eingeht. Je höher jedoch der Intensitätswert und damit der gemessene Wert der Primäre beim Abgleich, desto höher ist auch der Mittelwert im Nenner. Somit steigt der CV rechnerisch, jedoch nicht untersuchungsbedingt.²⁷

²⁷ Methodische Schlussfolgerungen sind bezogen auf persönliche Rückmeldung der Autoren auf erste Fragestellungen. Es erfolgten leider keine vertiefenden Antworten auf neuerliche Fragen.

Sehr aktuell stellen sich die Untersuchungen von REA ET AL. (2010) dar, werden jedoch bisher als eher provisorisch betrachtet. Ausgangspunkt ist die Annahme, dass in den in der Straßenbeleuchtung vorkommenden Leuchtdichtebereichen von $L=0,1\text{cd/m}^2$ bis $L=1\text{cd/m}^2$ keine Stäbchenbeteiligung vorhanden ist und somit eine Kombination aus gewichtetem S-Zapfenanteil und dem 2° Normalbeobachter ausreicht. Es wird die Gleichungsform 17 vorgeschlagen, wobei der Faktor g abhängig von der Leuchtdichte ist. Bei niedrigem Niveau nimmt g den Wert 1,5 ein, bei höheren Leuchtdichten den Wert 2,5.

$$B(\lambda) = V(\lambda) + g \cdot S(\lambda) \quad (\text{Gl.17})$$

Begründung findet diese Annahme in Untersuchungen von WEALE (1953) und WOOTEN (1975). Untersucht wurden in beiden Studien schmalbandige Reize vor einem langwellig-dominanten Hintergrund (Glühlampe) in bestimmten Exzentrizitäten und teilweise in Messung der spektralen Empfindlichkeit nach Abschalten des photopischen Adaptationshintergrunds. Generell ist bei beiden Untersuchungen eine erhöhte spektrale Empfindlichkeit der S-Zapfen zu erkennen. Ob die Annahme zur Begründung genannter Rezeptorinteraktion ausreicht, ist hinsichtlich der Ergebnisse von RIPAMONTI ET AL. (2009) zu betrachten. Dessen ungeachtet führte das Team um REA bisher drei Untersuchungen durch, um den Koeffizient g zu bestimmen. Das erste Experiment beschäftigt sich mit einem DBM unter Verwendung der Forced-Choice-Methodik. Zehn Probanden, durchschnittlich 32 Jahre alt, hatten zwei komplexe Miniaturszenen, beleuchtet mit jeweils einer Hochdrucknatriumdampflampe und einer Keramik-Metallampflampe, zu bewerten. Adaptiert wurde fünf Minuten an die o. g. Leuchtdichteniveaus. Anschließend musste eine der beiden beleuchteten Szenarien als heller eingeschätzt werden. Bewertet wurde die 50 % Schwelle der Einschätzung beider spektraler Verteilungen bei $E=17\text{ lx}$ ($L=1\text{ cd/m}^2$) und $E=2,2\text{ lx}$ ($L=0,13\text{ cd/m}^2$). In ähnlicher Weise, jedoch mit elf Probanden (Durchschnittsalter 29 Jahre) wurde Experiment zwei durchgeführt. Es erfolgte eine Variation der schon in Experiment eins genannten Lichtarten durch Zugabe von UV-Anteilen. Im abschließenden Teil zur Untersuchung von g wurden fünf spektrale Verteilungen unter oben gegebenen Adaptationsbedingungen untersucht. Grundsätzlich schlussfolgern die Autoren, dass mit dem vorgeschlagenen Modell keine komplexen Interaktionen bezüglich des chromatischen Einflusses auf die Hellempfindung abgebildet werden können. [REA ET AL. 2010]

Auch an dieser Stelle ist eine kritische Betrachtung vonnöten. Es wird davon ausgegangen, dass ein Einfluss kurzweilig empfindlicher Rezeptoren vorhanden ist. Dass dies allein auf die am weitesten im kurzweiligen Bereich sensitiven S-Zapfen übertragen wird, scheint unglücklich. Mit dem gewählten Versuchsdesign ist es nicht möglich bei gegebenen Adaptationsleuchtdichten (5 Minuten Adaptationszeit) einen Einfluss der Stäbchen zu isolieren. Untersuchungen der CIE 141 haben bereits bestätigt, dass ein Stäbchenanteil vorliegen muss. Betrachtet man die Ergebnisse des dritten Experiments, ist es auch unter Annahme erweiterter Varianz nicht nachzuvollziehen, dass bei der niedrigeren Adaptationsleuchtdichte ein Spektrum mit deutlich geringem S/P-Verhältnis (0,73 zu 1,12) bzw. S-Zapfen/P-Verhältnis (21,5 zu 49,9) um 40 Prozent heller eingeschätzt wird als die Referenz. Dies spricht für eine Modellerweiterung bezüglich aller am mesopischen Sehen beteiligter Rezeptoren.

In diesem Kapitel ist eine Vielzahl von Untersuchungen und Ergebnisinterpretationen aufgezeigt. Neben den schon in der CIE 141 und CIE 89 dargestellten Modellen ist ersichtlich, dass auch weiterhin eine große Anzahl an Forschungsgruppen die Thematik eines „mesopischen Modells“ zur Beschreibung der Hellempfindung bearbeitet. Bei der Interpretation der Arbeiten ist aufgrund der Komplexität und der Vielfalt an Variablen keine eindeutige Stoßrichtung zu erkennen. Für eine klare zukünftige Beschreibung sind jedoch die Entwicklung eines 4-Komponentenmodells voranzutreiben und, wenn möglich, zukünftige Forschungsaktivitäten zu koppeln.

4.1.3 Weiterführende Forschungen zum Vergleich der Hellempfindungen

Im Gegensatz zu Kapitel 4.1.2 finden oftmals Studien zum mesopischen Hellempfinden statt, ohne die Ergebnisse anschließend zu modellieren. Zielsetzung ist dabei vor allem, Relationen zum Empfinden der untersuchten spektralen Verteilungen zu erheben. Es wird eine Quantifizierung der Hellempfindung anhand verschiedener Variablen durchgeführt, jedoch nicht im Sinne einer allgemeinen Abbildung weitergehend betrachtet. Es handelt sich um eine Abschätzung von Effekten für praxisrelevante Fragestellungen, wodurch eine Ergebnisvergleichbarkeit erschwert wird. Einen globalen Überblick der bis 1988 getätigten Studien lässt sich in der CIE 78 nachschlagen.

Äußerst vielfältige Studien mit internationalem Hintergrund fanden zur Thematik Sicherheit und Sichtbarkeit im Straßenverkehr statt. Nicht nur sehleistungsorientierte Arbeiten vor dem Hintergrund der Bestimmung von Kontrastschwellen und Reaktionszeiten wurden durchgeführt, sondern auch Untersuchungen zur Blendempfindlichkeit des Menschen bei vorkommenden spektralen Verteilungen sowie erweiterten Fragestellungen zur Sichtbarkeit und Sicherheit. [vgl. ALFERDINCK 1996, 2006 & 2009; LACHENMAYR ET AL. 1997; SULLIVAN ET AL. 2001; BLUMTRITT 2004; FEKETE ET AL. 2005; DERLOFSKE ET AL. 2007; BULLOUGH ET AL. 2009; SCHILLER ET AL. 2007 & 2010; ETC.] Weiterhin haben Studien mit Bezug auf die Innenraumbeleuchtung und die ortsfeste Straßenbeleuchtung stattgefunden [ELOHOLMA ET AL. 2004]. Grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse gehen unter anderem aus Arbeiten von FOTIOS ET AL. (1997, 2001A, 2009B) hervor. Eine Übersicht zu weiteren Forschungsarbeiten liefern FOTIOS & GADO (2005 & 2009B).

Von besonderer Relevanz für einen späteren Vergleich der Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Arbeit zu bereits bestehenden Ergebnisinterpretationen sind Studien, welche sowohl ähnliche breitbandige spektrale Verteilungen unter mesopischen Adaptationsbedingungen untersuchten sowie Aussagen über eine relative Helligkeitsbasierte Empfindung treffen. Zum besseren Vergleich der evaluierten Daten sind ähnliche Variablen, wie beispielsweise die spektrale Verteilung, zu favorisieren. Mit dem Aufkommen der LED-Lichtquelle im Automobilbereich fanden umfangreiche Studien zum Vergleich von Halogenlichtquellen, Gasentladungslampen und LED-basierten Lösungen statt. DERLOFSKE ET AL. untersuchten im Jahr 2005 die mesopische Leuchtdichte und deren Unterschiede in Abhängigkeit von der Lichtquelle. Dazu wurden 17 weiße LEDs unterschiedlicher S/P-Verhältnisse je einer Halogen und einer Gasentladungslampe (HID) gegenübergestellt. Aus Berechnungen nach dem sehleistungsbasierten Modell von REA ergab sich in Abhängigkeit des S/P-Wertes eine bis zu 50 % erhöhte mesopische Leuchtdichte von LED gegenüber Halogen und ein bis zu 35 % erhöhter mesopischer Leuchtdichtewert für HID-Lichtquellen bei einer photopischen Leuchtdichte von $L=0,01 \text{ cd/m}^2$. Mit steigender Adaptationsleuchtdichte konnte ein Abfall der Diskrepanz festgestellt werden. Bei nunmehr $L=0,1 \text{ cd/m}^2$ betrug der Unterschied zu Halogen nur noch ca. 30 % und zu HID ca. 18 %. Kein Unterschied wurde bei der Adaptationsleuchtdichteannahme von $L=1 \text{ cd/m}^2$ berechnet.

Die Beurteilung von Lichtspektren auf der Straßenoberfläche wurde von OKAWA ET AL. untersucht. Gegensätzlich zur oben genannten Berechnung fand in dieser Studie eine empirische Datenevaluation statt. Als Referenz standen dem Probanden spektrale Verteilungen in der Form von Halogen, HID und LED zur Verfügung. Während des Direktabgleichs der $L=13 \text{ cd/m}^2$ betragenden Stimuli (Umfeld $L=1 \text{ cd/m}^2$) stellte der Proband eine geometrisch gleiche Darstellung der Straßenprobe eines CRT-Monitors auf subjektiv gleiche Helligkeit ein. Die spektrale Verteilung des CRT kann hierbei als eine Art von Transfornormal betrachtet werden, welches in der

Datenauswertung die Anwendung des Prinzip der Transitivität erlaubt. Am Experiment nahmen 40 Probanden mit einem Altersdurchschnitt von 48 Jahren teil. Die Adaptationszeit betrug fünf Minuten. Für die äquivalente Leuchtdichte des CRT-Spektrums ergaben sich Mittelwerte von $L_{eq}=18,95$ cd/m² für Halogen, $L_{eq}=22,09$ cd/m² für HID und $L_{eq}=30,35$ cd/m² für LED. Leider geht aus der Untersuchung nicht hervor, worauf die Probanden adaptierten. Betrachtet man sich die Standardabweichungen der Abgleiche, ordnen sich diese in jene Größenordnung der „Matches“ selbst ein. Es ist weiterhin nicht nachvollziehbar, warum die Stimulusleuchtdichten nahe dem photopischen Level gewählt wurden und dem Vorkommen in der Realität entbehren. Neben der geringen Adaptationszeit ist nicht ersichtlich, inwieweit sich beim Abgleich die RGB-Werte des CRT relativ zueinander verändert haben und somit unterschiedlich auf die Rezeptoren einwirkten. [vgl. OKAWA ET AL. 2009]

Weitere Angaben zu einer gesteigerten Hellempfindung von „bläulichem“ Licht gegenüber langwellig dominantem kann einer Untersuchung KUBENA's und Kollegen (2009) entnommen werden. Diese verglichen die Hellempfindung in Abhängigkeit der ähnlichsten Farbtemperatur. Proklamiert wird in dieser Studie (60 Probanden) ein erhöhtes Hellempfinden von 37 % einer LED (CCT=6200 K) im Vergleich zu HID (4000 K). Bezüglich gleicher LED zu Halogen (3200 K) ergibt sich eine gesteigerte Empfindlichkeit von 38 %. Modellbehafet soll sich im Vergleich von HID zu Halogen eine Mehrempfindung von 32 % herausstellen. Wie verlockend solche Angaben für Produzenten und Hersteller von Lichtsystemen klingen, ist unschwer vorstellbar, ließe sich doch der Lichtstrom und somit die eingespeiste Energie um eben jenen Prozentsatz senken. Es ist allerdings auch die Qualität der Studie verschärft zu betrachten. Aus vorangegangenen Kapiteln ist ersichtlich geworden, wie wichtig die Adaptation auf ein Leuchtdichteniveau ist. Selbst auf Anfrage konnte nur bestätigt werden, dass keines gemessen wurde. Es herrscht eine inhomogene Lichtverteilung, die kein einheitliches Abgleichkriterium zulässt. Ebenso ist bekannt, dass unterschiedliche spektrale Verteilungen zu differierenden Reizpotentialen innerhalb der retinalen Strukturen führen. Eine ähnlichste Farbtemperatur ist kein Indiz für die verwendeten spektralen Kompositionen der Stimuli. Diese Studie betreffend wurden die unterschiedlichen CCTs nicht durch Lichtquellen an sich erzeugt, sondern durch spektral abfallende jedoch kontinuierliche Filterung einer LED-Lichtquelle (CCT 6189 K). Ein Vergleich zu einem Linienspektrum bei Xenonscheinwerfern ist nicht gegeben.

Eine Untersuchung zum Helligkeitsvergleich verschiedener Lichtquellen unter Verwendung homogen ausgeleuchteter Vergleichsflächen eines 20° Schwinkels an einer Trennkante fand 2007 im L-LAB statt. Verglichen wurden wieder die gängigen, in der automobilen Lichttechnik Anwendung findenden Lichtquellen Halogen (H7), Xenon (D2R) und LED. Ein Abgleich wurde von 27 naiven Versuchspersonen (Altersdurchschnitt 28 Jahre) anhand der Referenzen H7 und D2R gegenüber der Testlichtquellen D2R und LED durchgeführt. Als Adaptationsleuchtdichten der Referenz wurden 0,1; 1 und 5 cd/m² gewählt. Insgesamt erfolgten für je drei Abgleiche auf dem jeweiligen Adaptationsniveau zwei unterschwellige sowie zwei obereschwellige Reizdarbietungen. Beim kleinsten Adaptationsniveau lässt sich ein gesteigerter, signifikanter Wert von 11 % von Halogen bezüglich Xenon herausfiltern, was im Gegensatz zum bisher Beschriebenen steht. Für $L=1$ cd/m² ist bei den Vergleichen D2R auf H7 ein Anstieg der Hellempfindlichkeit, bezogen auf die Testlichtquelle, um 5 % bis hin zu 18 % bei LED auf H7 zu erkennen. Eine nochmalige Steigerung beim höchsten Adaptationsniveau ergibt sogar 25 % mehr Empfindlichkeit bei LED zu Halogen. [vgl. GOTTSCHALK 2007; KLEY ET AL. 2007] In einer Weiterführung der Untersuchung mit Variation der Stimulusgröße auf 2 mal 18° und fünf Probanden ist eine deutliche Verlagerung der experimentellen Werte zu noch höheren Empfindlichkeiten bis hin zu 30 % von LED bezüglich H7 und $L=5$ cd/m² zu erkennen. [vgl. GOTTSCHALK 2007]

Mit identischer Fragestellung und ähnlichem Untersuchungsdesign unterstützen KHANH ET AL. die Erfassung der Hellempfindung genannter spektraler Verteilungen mit geringeren Leuchtdichten. Anhand eines zweigeteilten Vergleichsfeldes stellten 20 Probanden jungen Alters die gleiche Hellempfindung der Testlichtquellen (D2R, HID, LED) auf Halogen ein. Adaptationsbestimmend waren die Leuchtdichten 1,5; 0,5 und 0,1 cd/m². Das stimulierte Sehfeld lag bei insgesamt 25°. Anders, als zu vermuten, nimmt bei der LED und der Gasentladungslampe (HID) die Hellempfindung mit abnehmendem Adaptationsniveau auch ab. Bei L= 1,5 cd/m² liegt die Relation bei 25,4 %, bei L=0,1 cd/m² wird LED nur noch 16,3 % heller empfunden als Halogen. [vgl. KHANH 2008]

Ob die Ergebnisunterschiede zwischen beiden Untersuchungen in der Differenz der CCT von knapp 1100 K (jeweils LED zu H7) zu suchen sind, scheint zweifelhaft. Eventuell ist ein Einfluss der unterschiedlich stimulierten Netzhautgröße und der damit verbundenen Effekte ausschlaggebend. Auffällig ist bei beiden Studien die Verwendung von Stimulusgrößen außerhalb der 2° bzw. 10° Normalbeobachter, jedoch der Nutzung einer V(λ) basierten Größe zur Ermittlung der äquivalenten Leuchtdichte. Es ist hervorzuheben, dass die 2° basierte Messgröße in beiden Fällen nicht mit der dem menschlichen Auge vorliegenden Empfindung vergleichbar ist, wodurch es von vornherein zu Verzerrung der durch den Probanden empfundenen Helligkeiten und der durch die äquivalente Leuchtdichte beschriebenen Helligkeiten kommt.

Weiterführend fand eine Studie zum Vergleich von in der ortsfesten Straßenbeleuchtung vorkommenden Lichtquellen statt. Adaptiert wurde der schon vorgestellte Versuchsaufbau, basierend auf einem vertikal geteilten Präsentationsfeld mit einem Sehwinkel von 30,8°. Bei den bereits verwendeten Adaptationsleuchtdichten beschriebener Studie hatten die 19 Probanden die Aufgabe, anhand von drei Wiederholungen die Spektren einer Cosmopolisgasentladungslampe (CPO), einer Metaldampf-Halogenlampe (MH) und einer Natriumdampf-Hochdrucklampe (NAV) auf ein fixes Referenzfeld mit einer Quecksilberdampf-Hochdrucklampe abzugleichen. Besonders ausgeprägt ist der Unterschied in der Helligkeitswahrnehmung beim Abgleich von NAV auf die Referenz, bei welchem die Probanden die Testlichtquelle 51 % heller einstellten als die Referenz. Begründet ist dies vor allem in den spektralen Verteilungen beider Lichtquellen und der Wirksamkeit des Purkinje-Effekts bei L=0,1 cd/m². In Anbetracht der existierenden mesopischen Modelle fand eine Berechnung der gemessenen Werte und ein Vergleich mit den empirisch ermittelten Daten statt. Die modellbehafteten Werte eines äquivalenten Leuchtdichteverhältnisses erreichten keine signifikante Verbesserung gegenüber den einfach photopisch bestimmten Werten. [BODROGI ET AL. 2010]

Es herrscht eine scheinbare Ähnlichkeit der vorgestellten Studien zum Hellempfinden. Diese sind jedoch nur anhand weniger Parameter vergleichbar. Ergo auch deren Ergebnisse. In Tabelle 7 sind die wichtigsten Parameter nochmals zusammengetragen. Ziel zukünftiger Arbeiten sollte es sein, Variablen zu implementieren, um eine Vergleichbarkeit eigener Ergebnisse mit schon gewonnenen Erkenntnissen zu ermöglichen. Es stellt sich als Gratwanderung heraus, Systemparameter so anzupassen, dass zusätzlich eigene Forschungsansätze verfolgt werden können, Defizite vorangegangener Arbeiten behoben werden und gleichsam eine gemeinsame Datengrundlage geschaffen wird. Da es sich bei der Untersuchung des Hellempfindens um psychophysikalische Versuche handelt, ist ein empirisch haltbarer Ansatz zu wählen sowie auf eine Eliminierung methodischer Artefakte zu achten. Kritische Punkte sind eine physikalische Exaktheit bei der Stimulusrealisierung, eine Erhebungsmethode, welche eine wahrnehmungsorientierte Datengewinnung ermöglicht sowie eine statistische Datenauswertung von entsprechender Güte.

Studie	Feldgröße	Methode	L _{ad}	Stimuli (x;y;CCT)		Probanden
				Referenz	Test	
DERLOFSKE (2005)	-	Modell REA	0,01cd/m ² 0,1cd/m ² 1cd/m ²	Ha (0,4;0,4;3755K) HID (0,39;0,38;3884K)	LED (S/P von 2,31-1,68)	-
OKAWA (2009)	3,5x30°	DBM	13cd/m ² 1cd/m ² (Umfeld)	Ha (0,442;0,41) HID (0,39;0,401) LED (0,35;0,352) (auf Straßenprobe)	CRT Spektrum	40 (M=37;W=3) Ø _{Alter} =48 Jahre
KUBENA (2009)	k. A. vertikal geteilt	DBM	k. A.	LED (6189K)	HID (4000K) LED (6200K) (gefiltert) HID (3200K) (berechnet)	60 (M=30;W=30)
GOTTSCHALK & KLEY (2007)	20° vertikal geteilt	DBM	0,1cd/m ² 1cd/m ² 5cd/m ²	Ha (0,448;0,412;2880K) HID (0,42;0,403;3300K)	HID LED (0,345;0,328;5500K)	27 (M=13;W=14) Ø _{Alter} =28 Jahre
GOTTSCHALK (2007)	36° vertikal geteilt					5
KHANH (2008B)	25° vertikal geteilt	DBM	0,1cd/m ² 0,5cd/m ² 1,5cd/m ²	Ha (0,448;0,403;2800K)	HID I (0,393;0,396;3800K) HID II (0,351;0,366;4850K) LED (0,318;0,288;6550K)	20
BODROGI (2010)	30,8° vertikal geteilt	DBM	0,1cd/m ² 0,5cd/m ² 1,5cd/m ²	Ha (0,43;0,408; 3160K)	HID (0,836;0,392;3960K) LED (0,303;0,284;7860K)	19
				HQL (0,39;0,38;3560K)	CPO (0,483;0,412;2440K) MH (0,426;0,446;3510K) NAV (0,553;0,421;1860K)	
FOTIOS (2010B)	38x37° vertikal geteilt	DBM SBBM	0,1cd/m ² 0,35cd/m ² 0,7cd/m ²	HPS (2000K)	CFL (3000K) MH1 (2800K) MH2 (4200K)	21 (M=13;W=8)

Tabelle 7: Studiengegenüberstellung zum Abgleich auf gleiche Hellempfindung und deren Parameter (CCT's wurden aus den Studien übernommen, auch wenn außerhalb des CIE-Gültigkeitsbereichs; DBM:Direct Brightness Matching; S/P: skotopisch/photopisches Verhältnis; Ha: Halogen, H7; HID: Gasentladungslampe, Xenon, D2R; CRT: Kathodenstrahlröhre; HQL: Quecksilberdampf-Hochdrucklampe; CPO: Cosmopolis-Entladungslampe; MH: Metaldampf-Halogenlampe; NAV: Natriumdampf-Hochdrucklampe; HPS: Hochdruck-Natriumdampflampe; CFL: Kompaktleuchtstofflampe)

4.2 Konkretisierung forschungsrelevanter Aspekte zur Evaluation der Hellempfindung

4.2.1 Forschungsmethoden

Wie in Kapitel 3.5 dargelegt, existiert eine Vielzahl von Methoden zur Ermittlung der spektralen Hellempfindung. Für einen helligkeitsbasierten Forschungsansatz im Mesopischen scheiden frequenzbasierte, also zeitlich aufgelöste Ansätze aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik der beteiligten Rezeptoren und der nachgeschalteten Signalverarbeitungswege aus (vgl. Kapitel 2 & 3). Dadurch, dass sich die hier zugrundeliegende Forschungsfrage mit einer Hellempfindung beschäftigt, sind auch jene Methoden abzulehnen, welche auf der Sehleistung basieren oder nur den achromatischen Anteil des Luminanzkanals stimulieren. Im Verlauf der vorliegenden Arbeit stellen breitbandige Reize eine Variable dar. Diesbezüglich ist die Verwendung von monochromen Spektren, welche bei der Farbmischung (Colorimetry) Verwendung finden, ausgeschlossen. Aus den genannten Ausschlüssen resultierend, sollen die Methoden des Direktvergleichs (DBM), des gedächtnisbasierten Vergleichs (MBM) und des sukzessiven Vergleichs (SBBM) gegenübergestellt werden. Insbesondere die in einer Vielzahl von anderen Studien genutzte Methodik des Direct-Brightness-Matching wird einer vertiefenden Analyse unterzogen. In Abbildung 30 sind die Methoden und deren Abgleichsvorgänge visualisiert.

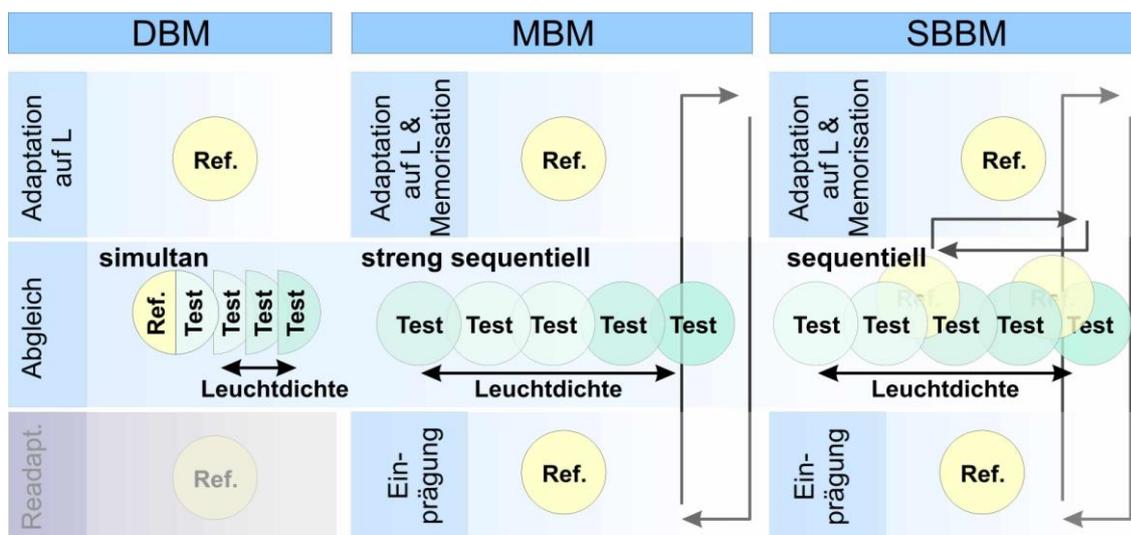


Abbildung 30: Vergleich der direkt-, gedächtnis- und sukzessivbasierten Vergleichsmethoden

Kennzeichnend für alle drei Methoden ist in der ersten Phase die Adaption auf die Leuchtdichte L der jeweiligen Referenz, ggf. ein Vorgang der Memorization, also der Reizgrößenverankerung beim Probanden. Bezogen auf die DBM-Methode ist es nicht immer gewährleistet, dass eine Adaption auf das gesamte, später zur Stimulation genutzte Sehfeld stattfindet. Hierzu müssten sich in beiden Hälften des Versuchsaufbaus identische Lichtquellen befinden, welche zum Zweck der Adaption die räumlich getrennten Darbietungsfelder homogen ausleuchten. Sollte eine Adaption nur mit einem Darbietungsfeld durchgeführt werden, erfolgt eine differenzierte lokale Adaption der Netzhaut, welche beim Abgleichvorgang nicht der stimulierten Netzhautgröße des Test- und Referenzfeldes entspricht. Während der zweiten Phase erfolgt der Abgleich der jeweiligen Testgröße auf die Referenzgröße. Beide sind in der Darstellung mit der Leuchtdichte angegeben. Beim Direktvergleich erfolgt ein simultaner Abgleich beider Stimuli, wobei die Intensität (z.B. Leuchtdichte) variiert wird. Beim Abgleichskriterium „gleich hell“ soll der Proband beide Darbietungsfelder auf gleiche Hellempfindung abstimmen. Wird das Kriterium der minimalen Unter-

scheidbarkeit verwendet, ist auf einen gerade noch sichtbaren Helligkeitsunterschied abzugleichen. Im Gegensatz zum Direktvergleich erfolgt die Abstimmung der bei der MBM-Methode eingprägten Referenz aus dem Gedächtnis auf den dargebotenen Teststimulus. Es erfolgt keine simultane Darbietung beider Reize, so dass die stimulierte Netzhautgröße dem vorher adaptierten retinalen Areal entspricht. Während des Einstellvorgangs wird die Reizgröße (z.B. Leuchtdichte) in der Intensität variiert. Eine Erweiterung und im übertragenen Sinn eine Verschmelzung bisheriger Methoden stellt die sukzessiv binokulare Methode des SBBM dar. Während es sehr schwierig ist, beim Memory Brightness Matching eine Reizerinnerung der Referenz aufrecht zu erhalten, kann der Proband bei vorliegender Methodik die Referenz an Stelle des Teststimulus einblenden und somit auffrischen. Vorteil hierbei ist, dass Vergessenseffekte minimiert werden, gleiche retinale Bereiche Stimulation erfahren und sehr genaue Einstellbarkeiten möglich sind. Es ist hinzuzufügen, dass oftmals auch das Kriterium des Forced Choice genutzt wird, wobei der Proband nicht selbst eine Empfindung einstellt, sondern aus verschiedenen vorgegebenen Szenarien gemäß der Aufgabe eine Auswahl trifft. Oft wird die Aussage „gleich hell“ nicht zugelassen. Infolge eines sich wiederholenden Versuchsdesigns ist es nötig, zwischen den wechselnden Variablen den Probanden wieder auf einen Nullpunkt der Referenz zu führen. Es erfolgt der Vorgang der Readaptation. Oftmals findet dieser nicht bei DBM-Untersuchungen statt. In Abbildung 30 ist der Vorgang der Readaptation als Ursprungpunktsetzung auf die Referenz bei gleichem Adaptationsniveau, jedoch unterschiedlichen spektralen Verteilungen, definiert (chromatische Adaptation). Der Vorgang der Adaptation hingegen soll die Anpassung an verschiedene Strahldichten kennzeichnen.

In der Gesamtheit wissenschaftlicher Untersuchungen stellt sich die Verwendung der DBM als dominierend heraus. Es scheint naheliegend, dass der Vergleich von direkt benachbarten Reizen auch im realen Umfeld bedeutsam ist und somit durch die Anwendung des Direktvergleichs eine hohe Realitätsnähe abgebildet wird. Dennoch existieren verschiedene Einschränkungen und enorme Defizite in der Anwendung dieser Methode in der Forschung. Fundierte Angaben liefern FOTIOS und Kollegen in deren wissenschaftlicher Arbeit in Form von Ergebnisverzerrungen (Bias). Für die Präsentation des Test- und des Referenzstimulus wird ein zweigeteiltes Feld genutzt. Aufgrund der technischen Realisierbarkeit bildet jeweils ein Feld als Referenzfeld und das andere das Testfeld. Ist diese Aufteilung über die Untersuchung konstant, wird nur die Hälfte an Lichtquellen benötigt. Ein aufwändiger aufwändiger Aufbau wäre vermieden. Dem hinzuzufügen ist, dass bei einer kontinuierlichen Referenz-, Testfeldzuweisung einer unterschiedlichen Degradation oder Veränderung der Lichtquellen über die Zeit entgegengewirkt wird, da die Abgleiche unterschiedlich lang dauern können.

FOTIOS ET AL. (2001A) führten erstmalig einen Effekt des Position Bias auf, welcher einen Einfluss auf die Abgleichergebnisse hat. Dieser tritt ein, wenn die zu beurteilenden Felder nicht in einem ausbalancierten Verfahren gewechselt werden. Effektgrößen werden ausführlich in der Veröffentlichung von FOTIOS ET AL. (2008) behandelt, belaufen sich aber auf einen Fehler von bis zu 15 % bezüglich eines Vergleichs gleicher Lichtquellen als Referenz und Test in Form eines Null-Condition-Tests. [vgl. HOUSER ET AL. 2009] Wird dem Probanden die Aufgabe gestellt, den Teststimulus auf gleiche Helligkeit wie den Referenzstimulus per Einstellmöglichkeit zu justieren und es erfolgt kein Wechsel der Einstellung zwischen linker und rechter Handseite, ist zudem der Dimming Bias zu beachten. In Form von Null-Condition-Tests konnte nachgewiesen werden, dass tendenziell immer jene Seite dunkler eingestellt wurde, auf welcher sich die Intensitätsreglung des Probanden befand. Befindet sich die Einstellkontrolle des Probanden immer auf der Seite des Testreizes, wird dieser mit einer geringeren Hellempfindung bewertet, das eigentliche Ergebnis somit verzerrt. In der Auswertung verschiedener Datensätze aus vorangegangenen Studien extrahierte FOTIOS (2001B) auf den Effekt des Dimming-Bias zurückgehende

Fehlerwerte von 5,8 bis 14,5 %. Bei Verwendung des Direct Brightness Matching ist auf eine ausreichende Ausbalancierung zu achten. Diesbezüglich ist mit einem erhöhten technischen Aufwand zu kalkulieren. Weiterhin ist mitunter auf unterschiedliche Abnutzungserscheinungen der Lichtquellen zu achten und Verzerrungen diese betreffend sind nachzuegeln. Bei kleinen Stimulusgrößen ist die Direktvergleichsmethode an einer Trennkante aufgrund der lateralen Inhibition nicht anwendbar. Dies trifft auch dann zu, wenn als Abgleichregion die Trennkante definiert wird. Wie sich eine unterschiedliche räumliche Lokalisation der einzelnen Stimuli bei Abgleich auf die Reizentwicklung der Retina auswirkt, ist noch nicht hinreichend erforscht. Sollte die Abgleichregion in der Mitte eines Stimulusfeldes (Trennkante) liegen, ist mit einem erhöhten Einfluss des Simultankontrastes und eventueller chromatischer Adaptation zu rechnen.

Im Gegensatz zur DBM-Methode sind bei der MBM-Methode ein Großteil der Effekte ausgeschlossen, da es keine räumliche, sondern eine zeitliche Trennung der zu bewertenden Signale gibt. Als Vorteile machen sich das identisch stimulierte Netzhautareal bei Referenz- und Testdarbietung und ein einwandfrei bestimmbares Abgleichkriterium in der Mitte der Darbietungsfläche bemerkbar. Dennoch ist das Memory Brightness Matching relativ zeitaufwendig beim Abgleich. Durch die Verankerung des Referenzreizes und die Dauer des Abgleichs lassen sich „Vergessenseffekte“, in welchen die Referenz durch Adaptationseffekte ausgeblendet wird, nicht ausschließen. Leider sind in der wissenschaftlichen Literatur nur wenige Studien präsent, welche die Methode des MBM im vorliegenden Forschungskontext bewertet haben. Bezüglich heterochromatischer gedächtnisbasierter Helligkeitsvergleiche haben BODROGI & SCHANDA (1999) einen Vergleich der DBM- und MBM Methode aufgestellt. Verglichen wurden foveal dargebotene monochrome Reize, welche auf einen achromatischen Referenzreiz von $L=10 \text{ cd/m}^2$ abgeglichen werden sollten. 15 Probanden stellten je Methode die Helligkeit von ca. 1° umfassenden Sehobjekten ein. Es ließ sich eine generelle Vergleichbarkeit der Methoden nachweisen. Allerdings zeigten sich beim interindividuellen Vergleich signifikante Unterschiede beim Abgleich der äquivalenten Leuchtdichte auf die Referenzleuchtdichte zwischen beiden Methoden. Die Standardabweichung als Maß der Streuung von Daten und deren Reproduzierbarkeit heranziehend, lagen die mittels MBM gewonnenen Werte bis auf eine Ausnahme geringer, als bei der Direktvergleichsmethode. Gleicher Sachverhalt bestätigt sich bei einer intraindividuellen Datenauswertung, bei welcher alle Standardabweichungen unter den Werten des Direktvergleichs lagen. Bewertet wurden zehn Wiederholungen aller Stimuluspräsentationen eines Versuchsteilnehmers.

Ein weiterer Vergleich der zur Verfügung stehenden Methoden wurde in Japan durchgeführt. UCHIKAWA ET AL. verglichen die Genauigkeit der Helligkeitseinstellung von farbigen Lichtern ($\lambda_{\text{HWB}}=6 \text{ nm}$) zwischen DBM und einer Art des MBM²⁸. Gegenüber der Relevanz für Alltagssituationen des Direktvergleichs stellen diese heraus, dass es häufiger vorkommt, eine Farbe wahrzunehmen und diese unter einem zeitlichen Versatz mit einer anderen, nicht angrenzenden Farbe, zu vergleichen. Entsprechend einer foveal orientierten Wahrnehmungs- und Erkennbarkeitsleistung ist dies als gegeben anzusehen. Insgesamt erfolgten 116 Abgleiche von zwei Probanden. Entgegengesetzt zu den Ergebnissen von BODROGI ET AL. sind die Standardabweichungen aller Abgleiche für die MBM-Methode höher als für die DBM-Methode. Intraindividuell ist bei beiden Pro-

²⁸ Beim Direktvergleich wurden Test und Referenz gleichzeitig für eine Sekunde mit einer Unterbrechung von zwei Sekunden dargeboten. Bei der als sukzessiv bezeichneten Methode des MBM fand eine Stimuluspräsentation von einer Sekunde statt, gefolgt von einer elf Sekunden andauernden Reizausblendung, bevor für eine Sekunde der weiße einstellbare Reiz dargeboten wurde, wieder unterbrochen für zwei Sekunden und danach wieder für eine Sekunde sichtbar. Es folgte eine zyklische Darbietung.

banden eine Konstanz in der Einstellung bezüglich gleichen Hellempfindens zu erkennen. Bei einem Probanden liegen die Einstellwerte der gedächtnisbasierten Abgleiche immer unter den relativen Leuchtdichtewerten des Direktvergleichs, was auf „Vergessenseffekte“ der zyklisch alternierenden Präsentation der Stimuli zurückzuführen ist. Für Proband 2 sind die Werte beider Methoden prinzipiell vergleichbar. Die Autoren schlussfolgern, dass die Helligkeitsinformation durch beide Methoden reproduzierbar ist, jedoch die Variabilität der Daten um den Faktor 1,5 bis 2 höher ist, wenn die gedächtnisbasierte Methode Anwendung findet. [UCHIKAWA ET AL. 1986]

Weiterhin stellt sich bei nicht wiederholenden Abgleichen ein so genannter Interval-Bias ein, welcher durch die Präsentationsreihenfolge verursacht wird. Hierbei verhalten sich die verursachten Effekte analog zum Positional-Bias beim DBM und treten bei Abgleichen auf, welche keiner Wiederholung unterliegen. [vgl. JACKEL ET AL. 2006; HOUSER ET AL. 2009; FOTIOS ET AL. 2010B]

Einen Vergleich aller drei angeführten Methoden führten FAIRCHILD und Kollegen durch. Ziel war es, mittels verschiedener Methoden Originalbilder und auf einem Bildschirm dargebotene Bilder bei unterschiedlichen Beleuchtungsarten und Leuchtdichteleveln miteinander zu vergleichen und aus einer Anzahl an Reproduktionen das dem Original ähnlichste zu finden. Nach Ansicht der Autoren produziert die MBM-Methode für diese Sehaufgabe die besten Ergebnisse, gefolgt von der sukzessiven und direktvergleichsbasierten. Begründet wird dies vor allem mit einer gleichzeitigen Adaptation des Probanden auf zwei Bezugspunkte (DBM), je nachdem welcher Stimulus betrachtet wird. Dagegen zeichnet sich die sukzessive Methode durch eine sehr gute Genauigkeit der Vergleiche und hohen physischen Komfort aus, wobei der Abgleich beim Direktvergleich am leichtesten fällt. [FAIRCHILD ET AL. 1996]

Außerdem adaptiert die SBBM-Methode die Vorteile der MBM-Methode bezüglich einer Stimuluspräsentation. Des Weiteren ist durch die Möglichkeit des Wiederholens der Referenz in den Stimulusbereich ein direkter Vergleich aufeinander folgender Reize möglich, wodurch Vergessenseffekte minimiert werden. Ein Interval-Bias ist durch die Möglichkeit des kontinuierlichen Wiederaufnehmens der Referenz nicht möglich. Unter Beachtung aller durch Effekte herbeigeführten Verzerrungen und deren Behebung kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die Direktvergleichsmethode und die in Abbildung 30 beschriebene sukzessive Methode die Eigenschaft haben, gleiche Ergebnisse zu generieren. „The rapid-sequential method was also found to produce clear results and we found no reason to exclude it from future psychophysical research.“ [HOUSER ET AL. 2009] Bestätigung findet dies in den erhobenen Standardabweichungen bei einem durchgeführten Methodenvergleich von DBM und SBBM²⁹ mittels Analyse der Innersubjektoren. Infolge eines durchgeführten Null-Condition-Test (NCT) sind die Abweichungen der sukzessiven Abgleiche geringer. Die Verhältnisse, eine gleich eingestellte Hellempfindung bei unterschiedlichen Lichtquellen und $E=7,5 \text{ lx}$ ($L=0,35 \text{ cd/m}^2$) betreffend, sind in Abhängigkeit von der Evaluationsmethode kaum verschieden und ordnen sich in einer Größenordnung von unter 3 % ein. [vgl. FOTIOS ET AL. 2010B]

In Anbetracht der dargestellten Eigenschaften sowie Potentiale und Defizite einzelner Methoden wird die DBM-Methode für die weitere Forschungsarbeit ausgeschlossen. Zu den verbleibenden Methoden liegen zu wenige Untersuchungen vor, welche teilweise widersprüchlich sind. Demzufolge wird ein eigenständiger Methodenvergleich in Form eines Pretests durchgeführt (Kap.8).

²⁹ Es wechselten sich die Stimuluspräsentationen der Lichtquellen alternierend für einen Zeitraum von jeweils fünf Sekunden ab. Zwischen den Wechseln wurde für eine Dauer von 500 Millisekunden kein Stimulus dargeboten.

4.2.2 Spektrale Empfindlichkeitsfunktionen

Ziel von psychophysikalischen Untersuchungen ist es, die reizbasierte und vom Probanden wahrgenommene Empfindung erfassbar zu machen. In der Photometrie bedeutet dies die Umwandlung eines radiometrischen Reizes in eine Empfindungsintensität des visuellen Systems. Dementsprechend existieren spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen mit definierten Gültigkeitskriterien. Bei Auswahl der Versuchsvariablen ist die Frage zu stellen, ob die verwendete Empfindlichkeitsfunktion für das jeweilige Untersuchungskonzept auch das abbildet, was dem Probanden dargeboten wird, und worauf dessen Empfindung beruht. Der genannte Sachverhalt sei an einem Beispiel erläutert. In einem Versuch soll ein Helligkeitsabgleich durchgeführt werden. Die mit dem Reiz stimulierte Netzhautgröße entspricht einem Sehwinkel von 50° . Der Proband stellt seiner Empfindung folgend die zu vergleichenden Reize auf gleiche Helligkeit ein. Die Operationalisierung findet jedoch mit einem $V(\lambda)$ basierten Messgerät statt. Im Prinzip erfolgt somit eine Fehlbewertung der Empfindungsstärke durch die Messgröße (vgl. Kapitel 2 & 3).

Schlussfolgernd aus dem genannten Sachverhalt ist es zu empfehlen, die Parameter aneinander anzupassen. Da die Erhebung spektraler Empfindlichkeitsfunktionen sehr schwierig und aufwendig ist, ggf. differenzierte Fragestellungen zu bearbeiten sind, ist es zu empfehlen, spektrale Daten als Messgröße für die Empfindungsstärke zu erheben und diese entsprechend den Berechnungsvorschriften (vgl. Kapitel 3.3) in photometrische Größen zu transformieren. Durch die fast schon standardisierte Anwendung der $V(\lambda)$ -Funktion und deren Implementierung in verschiedenste Messgeräte gilt es, für eine vergleichende Dateninterpretation die Bewertung mittels 2° Normalbobachter zusätzlich durchzuführen. Kann davon ausgegangen werden, dass sich die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen nicht zu stark je Kriterium unterscheiden, sollte in Ermangelung entsprechend vorhandener Bewertungsfunktionen eine ähnliche genutzt werden.

In Kapitel 3.1 sind bereits eine Vielzahl an Hellempfindlichkeitsfunktionen aufgeführt worden. Im Zuge der in dieser Arbeit zu ermittelnden Größen ist eine Präferenz auf jene zu legen, welche keine Unterbewertung des kurzwelligen Spektralanteils eines Lichtreizes stützen. Genanntes ist insbesondere bei einer Verwendung von breitbandigen spektralen Verteilungen und einer Untersuchung im mesopischen Bereich, somit den Purkinje-Effekt berücksichtigend, angebracht. Des Weiteren ist eine Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit in Relation von der Methode vorhanden. Diesbezüglich unterscheiden sich die zur Verfügung stehende Kurven durch eine Berücksichtigung des chromatischen Anteils oder, dem Additivitätsprinzip folgend, nur dem Ansprechverhalten des achromatischen Kanals. Die vorliegenden Forschungshypothesen richten sich vornehmlich an ein Vergleichsprinzip, welches den chromatischen und den achromatischen Kanal anspricht. Inwiefern sich daraus Effekte ergeben, wird zu evaluieren sein.

Im Zuge der zu berücksichtigenden Relevanz für Anwendungsfälle, jedoch auch mit Anspruch an eine künftige theoretische Ergebnisinterpretation, gehen drei stimulierte Netzhautgrößen in das zu entwickelnde Versuchskonzept ein. Dies sind $\alpha=1,25^\circ$ für eine Evaluation der mesopischen Hellempfindung ohne Stäbchenbeteiligung (vgl. Kapitel 2). Weiterführend wird ein α von 10° betrachtet, um einer Region of Interest (ROI) für das Führen von Kraftfahrzeugen zu entsprechen (25 m Entfernung entspricht Entfernung Messwand ECE 1&2) [S.-CLAUSEN ET AL. 1992]. Im Straßenverkehr der Stadt und unter Berücksichtigung von Fußgängern sind erheblich größere Sehwinkel erforderlich. LACHMAYR bestimmt diese auf bis zu ca. 30° Abstand vom Zentrum der Sehachse und misst diesem $\alpha=60^\circ$ durchmessenden Feld „kardinale Bedeutung für viele Bereiche des modernen Verkehrswesens“ bei. Es wird ein Sehfeld bis ca. 5 m Entfernung vor den Beobachter abgedeckt [LACHMAYR 2006]. Dabei ist eine Untersuchung der Hellemp-

findung breitbandiger spektraler Verteilungen unter kleinen und großen Stimulusgrößen weiterhin von theoretischer Bedeutung. Die meisten mesopischen Systeme basieren auf einem Sehwinkel von 10° sowie monochromen Reizen.

Dem am Anfang dieses Kapitels beschriebenen Sachverhalt folgend, sind spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen zu wählen, welche die stimulierten Netzhautareale und deren Rezeptorstruktur abbilden. Leider existiert in der Literatur nur eine beschränkte Menge photopischer Wichtungsfunktionen, welche zudem die schon beschriebenen Anforderungen erfüllen und eine exakte Versuchsbasis als Grundlage haben sollen. Nach Kriterienprüfung wird die $V(\lambda)$ -Funktion für eine spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zusätzlich genutzt, die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen nach SHARPE ET AL. (2005) für ein $\alpha=1,25^\circ$ und $\alpha=10^\circ$ angewandt und die auf direkten Helligkeitsvergleichen basierenden Funktionen der CIE 75 für Sehwinkel von 2° und 10° herangezogen. Für die Bewertung der spektralen Strahldichte, entsprechend eines Ansatzes für $\alpha=60^\circ$, wird auf die Arbeit von KOKOSCHKA ET AL. (1985) zurückgegriffen und deren spektrale Empfindlichkeitsfunktion für einen photopischen 64° -Beobachter genutzt. Ein Vergleich der Ergebnisse zu anderen wissenschaftlichen Untersuchungen ist mittels $V(\lambda)$ -Bewertung möglich. Weiterhin bedingt die Eingrenzung des mesopischen Bereichs und der daraus resultierenden Adaptationsprozesse die Zunahme von 2° -Normalbeobachter-basierten Werten. Den potentiellen Defiziten von $V(\lambda)$ soll mittels eines Vergleichs mit $V_{\text{phy}}(\lambda)$, einer jeweilig der Stimulusgröße angepassten Hellempfindlichkeitsfunktion, entgegengewirkt werden. Durch Verwendung der SBBM oder MBM Methode zur Evaluation sind die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der CIE 75 als Verbundsystem mit der 64° -Funktion von KOKOSCHKA ET AL. heranzuziehen. Durch dieses Vorgehen soll ein Vergleich einer mesopischen Hellempfindlichkeitsbewertung in Abhängigkeit von einer stimulusgrößebedingten Empfindlichkeitsfunktion geprüft werden. Für die untersuchten Spezialfälle sind empfindungsgerechte Werte zu erwarten. In Tabelle 8 werden die Parameter zusammengefasst und im Anhang – Kapitel 4 (S. 204) sind die Werte der spektralen Empfindlichkeiten jeder Hellempfindlichkeitsfunktion zu entnehmen. In Abbildung 31 sind die wellenlängenabhängigen Werte visualisiert.

Stimulierte Netzhautgröße α	Bewertungssystem I (K_m)	Bewertungssystem II (K_m)		Bewertungssystem III (K_m)
		$V_2^*(\lambda)$ (683,37lm/W)	$V_{10}^*(\lambda)$ (683,16lm/W)	
$1,25^\circ$	$V(\lambda)$ (683 lm/W)	$V_2^*(\lambda)$ (683,37lm/W)	$V_{10}^*(\lambda)$ (683,16lm/W)	$V_{B2}(\lambda)$ (723,49 lm/W)
10°	$V(\lambda)$	$V_{10}^*(\lambda)$ (683,16lm/W)	$V_{K64}(\lambda)$ (696,98 lm/W)	$V_{B10}(\lambda)$ (723,49 lm/W)
64°	$V(\lambda)$	-	$V_{K64}(\lambda)$ (696,98 lm/W)	$V_{K64}(\lambda)$
Erhebungsmethode	FP	FP	FP & HBM	HBM

Tabelle 8: Zuordnung spezieller spektraler Hellempfindlichkeitsfunktionen einzelner in der Auswertung zu betrachtender Bewertungssysteme ($V(\lambda)$: 2° Normalbeobachter; $V_2^*(\lambda)$, $V_{10}^*(\lambda)$: spektrale Empfindlichkeitsfunktionen für 2° bzw. 10° Beobachter [SHARPE ET AL. 2005]; $V_{B2}(\lambda)$, $V_{B10}(\lambda)$: spektrale Empfindlichkeitsfunktionen für 2° bzw. 10° Beobachter, gewonnen mittels heterochromatischem Direktabgleich; $V_{K64}(\lambda)$: spektrale Empfindlichkeitsfunktionen für 64° Beobachter, gewonnen mittels heterochromatischem Direktabgleich [KOKOSCHKA ET AL. 1985]; K_m : berechnete Strahlungsäquivalente nach Kapitel 3.3)

Gegenüberstellung ausgewählter spektraler Empfindlichkeitsfunktionen

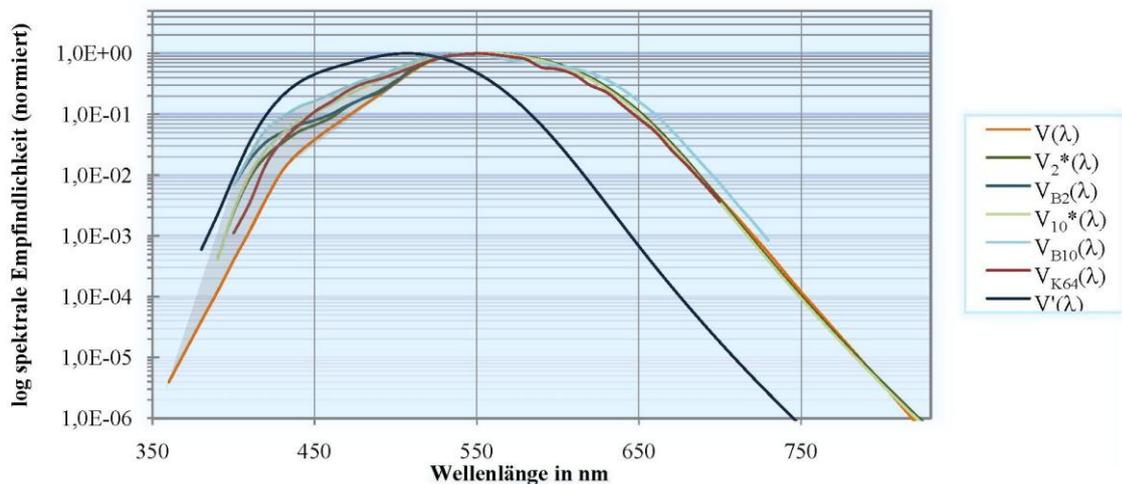


Abbildung 31: Darstellung der spektralen Verläufe genutzter Empfindlichkeitsfunktionen aus Tabelle 8 ($V(\lambda)$: 2°Normalbeobachter; $V_2^*(\lambda)$, $V_{10}^*(\lambda)$: spektrale Empfindlichkeitsfunktionen für 2° bzw. 10° Beobachter [SHARPE ET AL. 2005]; $V_{B2}(\lambda)$, $V_{B10}(\lambda)$: spektrale Empfindlichkeitsfunktionen für 2° bzw. 10° Beobachter, gewonnen mittels heterochromatischen Direktvergleich; $V_{K64}(\lambda)$: spektrale Empfindlichkeitsfunktionen für 64° Beobachter, gewonnen mittels heterochromatischen Direktvergleich [KOKOSCHKA ET AL. 1985]; $V'(\lambda)$: skotopischer Normalbeobachter [CIE 1951]; grauer Bereich: Unterschiede der spektralen Empfindlichkeit angegebener Empfindlichkeitsfunktionen im Vergleich zu $V(\lambda)$)

4.2.3 Spektrale Verteilungen der Stimuli

In Anlehnung an die in der Umwelt des Menschen vorkommenden Lichtarten sollen breitbandige spektrale Verteilungen den Kernpunkt der vorliegenden Forschungsarbeit bilden. Es ist abzuwägen, welche Lichtarten als Variable in die Untersuchung integriert werden, um ein möglichst umfangreiches Beschreibungssystem zu generieren, jedoch die Genauigkeit der später vorherzusagenden Werte nicht zu verzerren. Demzufolge gilt die Vereinbarung, vor allem Spektren zu nutzen, welche der Lichtfarbe „Weiß“ zuzuordnen sind. Diese sollen neben theoretischer auch von erheblicher praktischer Relevanz sein und innerhalb eines definierten CIE Gültigkeitsbereichs für ähnlichste Farbtemperaturen liegen.

Oft wird in ähnlichen Studien sehr schnell eine Konvertierung von spektralen Verteilungen zu einem Skalar oder einem relativen Wert vorgenommen. Infolge dessen ist eine Weiterverarbeitung der Daten mittels alternativer Ansätze der Empfindlichkeit etc. nicht mehr möglich. Die vorliegende Forschungsthematik wird sich, dem entgegengesetzt, weitestgehend an spektralen Verteilungen und deren Strahldichten orientieren. Dem folgend besteht die Anforderung nach einer hohen spektralen Reproduzierbarkeit während des gesamten Forschungsdesigns.

Für die Bewertung des Hellempfindens im mesopischen Bereich stehen als Stimuli vier praxisrelevante Spektren und ein stark kurzweilig dominantes Spektrum zur Verfügung. Im Straßenverkehr bildet das Halogenspektrum (Ha) den Hauptanteil des Auftretens bei der Kfz-Beleuchtung. Darüber hinaus ist für die Vergleichbarkeit mit anderen Studien das Spektrum des Halogen zu implementieren. Weiterhin sind die meisten lichttechnischen Messgeräte auf die Normlichtart A kalibriert, so dass messtechnische Abweichungen einer spektralen Halogenverteilung am niedrigsten sein dürften. Überdies stellt das kontinuierliche Ha-Spektrum einen Randpunkt der untersuchten spektralen Verteilungen dar. All diese Faktoren begründen die Entscheidung, Halogen als Refe-

renzlichtart für die in der Probandenstudie folgenden Helligkeitsabgleiche zu verwenden. Als Testlichtquellen dienen die in der Automobilbranche vertretenen Lichtarten des Xenon (Xe)³⁰ und der LED (LED). Für theoretische Belange der Steigerung des kurzwelligen Anteils als auch hinsichtlich einer weiteren übertragbaren Lichtart zu anderen Untersuchungen dient die Normlichtart D65 (D65). Bezüglich der Verwendung von D65 stellt die nicht existente spektrale Verteilung des P9K2 eine stark kurzwellig dominante spektrale Verteilung dar. Diese wurde durch Reduktion der mittleren und langen Wellenlängenbereiche zum Original einer Planck'schen Verteilung mit $T=4800$ K erzeugt. Eine spektrale Breitbandigkeit ist gewährleistet. Darüber hinaus tritt eine deutliche „Blaufärbung“ in Erscheinung. Die originalen spektralen Verteilungen und die durch den Forschungsaufbau simulierten spektralen Verteilungen sind im Anhang (S.209 f) dargestellt. Spektrenspezifische Parameter sind in Kapitel 6.3 aufgeführt.

Neben den spektralen Verläufen der Stimuli sind für die Bewertung gleicher Hellempfindungen die Adaptationsleuchtdichten von Belang. Jene ergeben sich aus der Bewertung der spektralen Energien mit der jeweiligen Empfindungsfunktion. Bezüglich der Grenzen und Einordnung des mesopischen Bereichs sind $V(\lambda)$ basierte Werte ausschlaggebend. Aus Abbildung 24 wird ersichtlich, dass eine obere Abgrenzung des mesopischen Bereichs nicht trivial ist. Es ist bislang noch umstritten, ab welchem Niveau eine photopische Beurteilung erfolgen sollte und ob bei einer Festlegung nur die Leuchtdichte oder eventuell auch die spektrale Verteilung der Stimuli ausschlaggebend ist. Deshalb bildet die obere Grenze ein Leuchtdichteadaptationsniveau von $L=10$ cd/m². Einige Autoren gehen von einer Stäbchenabstinenz ab $L=3$ cd/m² aus. Da zusätzlich einige lichttechnische Anwendungen in das eben genannte Leuchtdichtesegment fallen, stellt $L=3$ cd/m² die zweite adaptionsabhängige Größe dar. Eine Studienvergleichbarkeit auf theoretischer und praxisrelevanter Ebene ist bei $L=1$ cd/m² gegeben. Aufgrund noch zu erläuternder systemspezifischer Grenzen ist das unterste Adaptationslevel bei $0,5$ cd/m² angesiedelt, entspricht aber auch weitestgehend praktischen Konditionen (vgl. Kapitel 5).

4.2.4 Allgemeine Determinationen

Hinsichtlich der durchzuführenden Probandenuntersuchungen ergibt sich eine weitere Anzahl an Ansprüchen und Kriterien mit potentieller Ergebnisbeeinflussung. Folgendes gilt als Festlegung oder zumindest als anzustrebendes Kriterium.

- Infolge einer psychophysikalischen Studie ist auf einen ausreichenden Stichprobenumfang zu achten. Nur so ist eine inferenzstatistische und aussagekräftige deskriptive Statistik aufzubauen. Für eine klare Effektzweisung ist eine eventuelle heterogene Stichprobenszusammensetzung, je nach Hypothese, zu homogenisieren (z.B. Altersgruppe, Geschlecht, etc.).
- Aus dem Ansatz heraus, Ergebnisse der Stichprobe auf die Allgemeinheit abzubilden, wird auf die Beteiligung von Experten als Probanden verzichtet. Es handelt sich im Weiteren um ein naives Probandenkollektiv. Es ist davon auszugehen, dass hinsichtlich dieses Fakts die inter-individuelle Varianz zunimmt, jedoch durch eine erhöhte Probandenanzahl ein vertrauenswürdiger Mittelwert erhoben werden kann. Messwiederholungen sind durchzuführen.

³⁰ quecksilberbasiert

- Die Hellempfindung hängt definitiv von den am Sehvorgang beteiligten Rezeptoren ab. Fehlsichtige Personen sind daher vom Versuch auszuschließen.
- Durch einen aufzubauenden Forschungsstand müssen die ausgewählten Methoden, Leuchtdichteadaptationsniveaus und Spektren realisierbar sein.
- Es soll das Abgleichkriterium „gleich hell“ Anwendung finden. Diesbezüglich ist eine hinreichend große Anzahl an Quantifizierungsstufen der Stimuli zur Verfügung zu stellen, um den Unsicherheitsbereich zwischen der oberen und unteren Schwelle zu minimieren.
- Auf Grund des technischen Aufwandes und der sich potentiell ergebenden Ungenauigkeiten soll auf spektrale Neutralfilter sowie auf Regelblenden verzichtet werden. Es ist eine Möglichkeit zu finden, die Strahldichten der Stimuli über Maßnahmen zu steuern, welche keine Veränderung der spektralen Verteilung bezüglich der ursprünglich festgelegten Komposition bewirken.
- Zur Gewährleistung eines einheitlichen Abgleichkriteriums und einer konsistenten Adaptation ist eine homogene Präsentationsfläche zu wählen.
- Werden Lichtquellen eingesetzt, ist eine Kontrollinstanz in Form eines Detektors zu implementieren. Gegebenfalls ist ein Austausch entsprechender Lichtquellen bei ungleichmäßigen Abnutzungserscheinungen zu ermöglichen.
- Die Prämisse einer spektralen Genauigkeit in der Untersuchung verwendeter Stimuli ist zu erfüllen. Dies ist sowohl bei Präsentation auf die adaptationsbestimmenden Hauptleuchtdichten als auch auf den jeweiligen Intensitätsleveln der Dimmung zu gewährleisten.

KAPITEL 5

EXPERIMENTELLER AUFBAU

Die vorliegende Forschungsarbeit erhebt den Anspruch, eine spektralorientierte Hellempfindung breitbandiger Verteilungen zu analysieren. Spektralorientiert bedeutet, dass ausgehend von Hellempfindungsabgleichen nicht Leuchtdichten an sich bewertet werden, sondern spektrale Strahldichten von Lichtquellen. Diese wiederum sind soweit wie möglich konstant zu halten, um einen Vergleich von hinzuzuziehenden spektralen Hellempfindungsfunktionen und deren Eigenheiten zu erlauben.

Es stellt sich bisher als äußerst schwierig dar, Spektren, vergleichbar mit D65, zu erzeugen und, in welcher Art auch immer, deren Strahldichten kontrolliert zu regeln. Ähnliches gilt unabhängig von physischen vorhandenen Lichtquellen hinsichtlich einer freien Spektrenerstellung. Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist eine konstante Beibehaltung der spektralen Verteilung jedoch zu priorisieren.

Im vorliegenden Kapitel wird die Konzeption und Realisierung eines Forschungsstands aufgezeigt, welcher es ermöglicht, spektrale Verteilungen zu programmieren und weiterführend zu simulieren. Erweiterung bildet ein Projektionsaufbau, welcher die im vorigen Kapitel festgelegten Parameter erfüllt. Es werden sowohl Potentiale wie auch Restriktionen aufgezeigt und diskutiert.

Überdies wird eine eigens erzeugte Ansteuerungssoftware für die programmierbare Lichtquelle OL 490 präsentiert. Neben der Möglichkeit einer spezifischen DMD-Ansteuerung sind die Funktionalitäten einer echtzeitbasierten Spektrenmodifikation und Probandensteuerung implementiert.

5.1 Lichtquelle

Für die Lichterzeugung stehen den Forschern verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Neben Primärlichtquellen kommen oftmals spektrale Filter oder Reflektionsmedien zum Einsatz, welche das gewünschte Spektrum erzeugen. Sind reale Lichtquellen der zentrale Untersuchungsgegenstand, liegt es nahe, diese auch zu verwenden. Leider sind die Möglichkeiten der technischen Erzeugung real vorkommender Spektren, wie beispielsweise dem tageslichtähnlichen D65, äußerst begrenzt. Stehen diese Lichtquellen nicht zur Verfügung, wird als deren Entsprechung eine spektrale Mischung schmalbandiger (monochromer, ggf. monochromatischer) Reize dargeboten, welche zum Original äquivalente photometrische oder farbmetrische Werte aufweisen. Es lassen sich Angaben über die ähnlichste Farbtemperatur, das S/P-Verhältnis oder die Normfarbwertanteile finden. Solche Angaben sind sicherlich dienlich, Reize in bestehende Systeme einzuordnen, doch beschreiben diese nicht die spektrale Verteilung. Verantwortlich für die Reiz-Empfindungskette ist die Summe an rezipierten Photonen einzelner Wellenlängen. Ein metamerer Reiz kann im Photopischen u. U. gleiche Empfindungen auslösen, im Mesopischen ist dies weder erforscht, noch zu erwarten. Ergo ist eine dementsprechende Reizerzeugung grundsätzlich abzulehnen. Sollte eine Untersuchung nur durch Nutzung vorhandener Primärlichtquellen erfolgen, ist darauf zu achten, dass diese je nach Methode im spektralen Verhalten identisch sind und eine spektralkonsistente Intensitätsänderung erfolgen kann, um verschiedene Hellempfindungen zu stimulieren. Dadurch, dass jede Lichtquelle besondere Eigenschaften bezüglich der Umgebungstemperatur, Nutzungsdauer, Bestromung, etc. aufweist, ist der technische Realisierungsaufwand einer in sich validen Untersuchung nicht zu unterschätzen.

Dem folgend sowie die Ansprüche aus Kapitel 4.2 hinzunehmend, ist eine Analyse bestehender Technologien erfolgt. Für den Aufbau eines Forschungsstands wird erstmalig eine programmierbare Lichtquelle zum Einsatz kommen, welche prinzipiell jedes Spektrum innerhalb von $\lambda=380...780$ nm simulieren kann. Das von OPTRONICS LABORATORIES entwickelte Produkt OL 490 vereinbart nach Erweiterung der Ansteuerung zudem folgende Potentiale:

- Hohe Variabilität in der Spektrenerzeugung und damit die Möglichkeit zu deren Modifikation
- Geringe Ansprechzeiten bei der Spektrenpräsentation und bei der Spektrenauswahl
- Nutzung einer Primärlichtquelle zur Spektrenerzeugung, womit Unterschiede zwischen mehreren Lichtquellen einer Art wegfallen
- Spektral variable und neutrale Regulierbarkeit der Strahldichte

Die Funktionseinheit des OL 490 setzt sich aus drei Bausteinen zusammen:

- einer Lichterzeugungseinheit mit der Primärlichtquelle,
- einer Modulationseinheit zur Generierung der Spektren und
- einer Auskopplungseinheit zur Präsentation.

Ein entsprechender Aufbau ist in Abbildung 32 dargestellt.

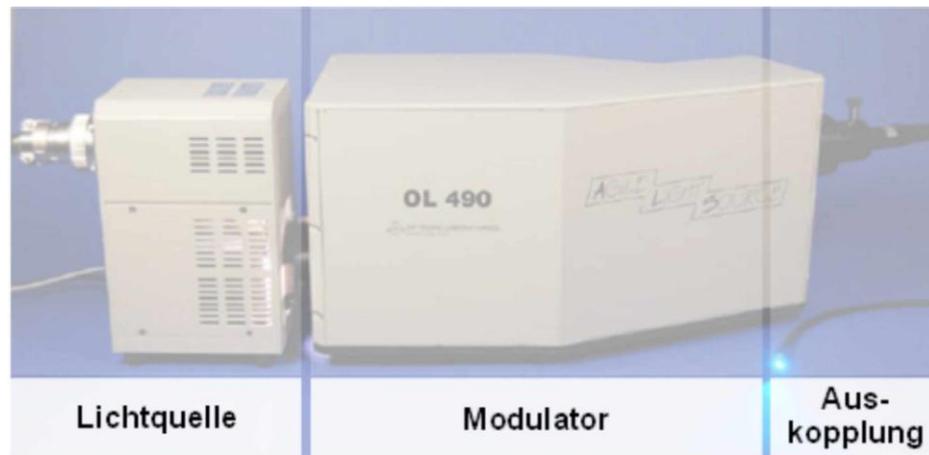


Abbildung 32: Funktionseinheiten der programmierbaren Lichtquelle OL 490 [vgl. OL 490]

Zur Spektrenerzeugung wird in einer separaten Einheit eine in der Vertikal- und Horizontalebene justierbare 500 Watt Xenon-Kurzbogen-Höchstdrucklampe verwendet, die bei Bedarf ausgetauscht werden kann. Eine neue Ausrichtung der Brennkammer und somit des Lichtbogens auf den folgenden Austrittsspalt ist in diesem Fall zu tätigen. Für den Austrittsspalt existieren Spaltbreiten von $150\ \mu\text{m}$ bis $700\ \mu\text{m}$. Je nach Spaltwahl wird der nutzbare Strahlungsfluss und die Genauigkeit der später abgebildeten Spektrallinien beeinflusst.

Das aus dem Spalt ausgekoppelte Licht wird im nächsten Schritt durch eine Kollimatoroptik abgebildet und parallelisiert. Eine zweite Verarbeitung des Primärspektrums findet durch ein Dispersionsgitter statt, dem eine Aufspaltung des Lichtes in einzelne Wellenlängen folgt. Diese werden auf einem DMD-Chip (Digital Micromirror Device) der Firma TEXAS INSTRUMENTS abgebildet [TI 2005]. Im Wesentlichen ist die Struktur des DMD mit einer Matrix aus 1024×768 Mikrospiegeln vergleichbar. Durch eine anliegende SRAM-Zelle kann jedes Spiegelement grundsätzlich zwischen den Winkeln von -12° und $+12^\circ$ mit einer Frequenz von $f=6,25\ \text{kHz}$ geschaltet werden. Die Abbildung der Spektrallinien und die geometrischen Eigenschaften des einzelnen Spiegelements erlauben eine spektrale Auflösung von circa $0,4\ \text{nm}$ je Spiegelspalte. Hinsichtlich des relativ zur Chipoberfläche ansteuerbaren Verkipfungswinkels findet die Strahlenreflexion entweder in eine „Lichtfalle“ oder zur Auskopplung in den Flüssigkeitslichtleiter statt. Mit Nutzung der 6-bit Auflösung umfassenden Pulsweitenmodulation können theoretisch für jede spaltenorientierte Spektrallinie 49152 Intensitätsstufen erzeugt werden. Eine Ansteuerung der Spiegelspalten bestimmt somit die spektrale Komposition des Lichts und die Variation der Spiegelzeilen deren Intensität. Signalanteile, die Auskopplung erfahren, gelangen mittels Flüssigkeitslichtleiter (Austrittsfläche $d=5\ \text{mm}$; numerische Apertur 0,59) zum Präsentationsmedium. Folgend ist die beschriebene Funktionsweise schematisch abgebildet. Der Aufbau eines DMD-Segments ist zur Veranschaulichung der Funktionsweise daneben gestellt.

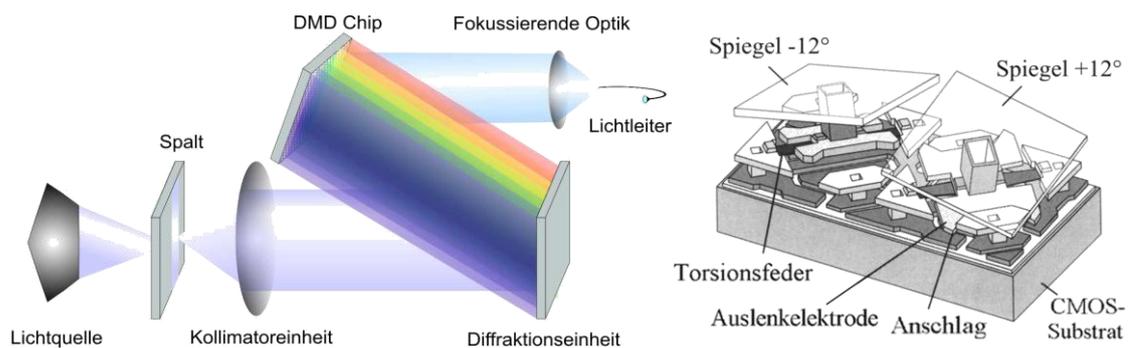


Abbildung 33: Schematische Darstellung der Funktionsweise des OL 490 und des DMD-Chips [mod. IPP 1999]

Ausgehend von der verwendeten Primärlampe ist in Abbildung 41 (Kapitel 6.1) ein typischer spektraler Verlauf und dessen relative Intensitäten verdeutlicht. Charakteristisch für die Technologie der Gasentladungslampen ist eine Abnutzung der Kathode und dadurch eine Veränderung des Lichtbogens in Abhängigkeit von der Zündhäufigkeit und vor allem von der Nutzungsdauer. Dieser Zustand beeinträchtigt in höchstem Maße den zur Verfügung stehenden Strahlungsfluss, also die auskoppelbare Lichtmenge. Wie sich die Problematik der Lampendegradation auf die Spektrenerzeugung auswirkt, ist in Kapitel 6 beschrieben. In Abhängigkeit von der Lichtquellenjustage innerhalb der Lichteinheit und die Höchstdrucklampe selbst betreffend sind marginale Unterschiede in deren Spektralverteilung nachzuweisen. Differenzen im Degradationsverhalten stellen sich als gravierend dar (Abbildung 34).

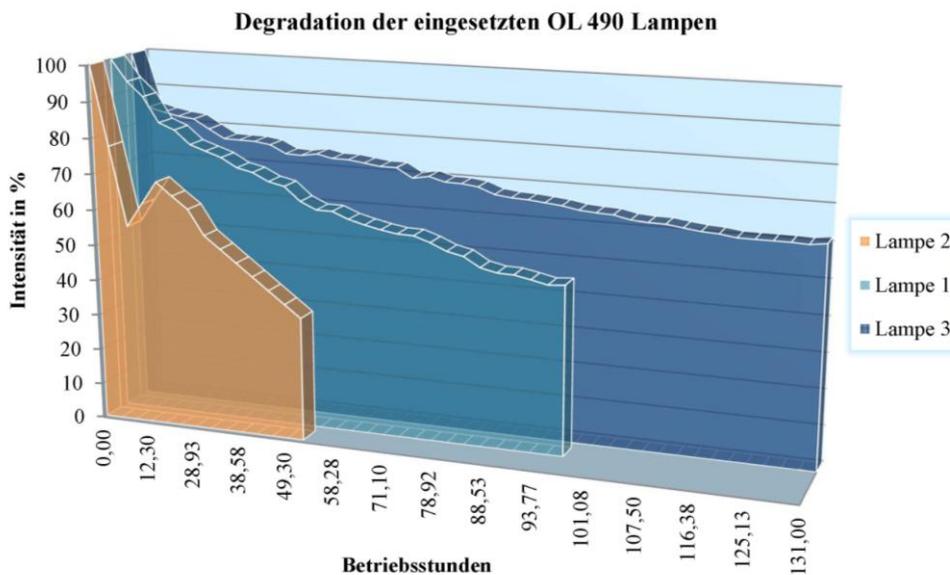


Abbildung 34: Intensitätsverlauf über die Betriebsdauer der eingesetzten Lampenprimäre des OL 490

Es ist hinzuzufügen, dass das OL 490 nicht für Einsätze in der Photometrie und deren Maßgaben konzipiert ist. Wie mit dem Problem der Lampendegradation vor dem Aspekt der Leuchtdichtekonzanz während der Versuchsreihen umzugehen ist, kann in Kapitel 6 nachgelesen werden.

5.2 Projektionsaufbau

Neben der Lichterzeugung stellt die Darbietung der Reize eine besondere Herausforderung dar. Durch Orientierung an spektralen Größen ist die Forderung nach spektraler Konstanz bei der Darbietung und der Veränderung der spektralen Intensitäten zu erfüllen. Es dürfen sich nicht die spektrale Zusammensetzung und deren Strahldichten zueinander ändern. Mit Hinblick auf die Auswertung und die dieser zugrunde liegenden Daten ist eine leuchtdichtehomogene Präsentationsfläche zu generieren. Die Begründung dieser Notwendigkeit ist in einer einheitlichen Abgleichkondition aller Probanden und einer identischen Adaptation des stimulierten Netzhautbereichs zu suchen. Nur unter Berücksichtigung dieser Punkte lässt sich eine valide und reliable Versuchsdurchführung gewährleisten.

Durch die Verwendung des OL 490 Flüssigkeitslichtleiters und dessen Beschaffenheit (insbesondere Apertur) ist weder eine angestrebte spektrale noch eine Leuchtdichtehomogenität einfach zu erzeugen. Diesbezüglich wurden unterschiedliche Methoden konzipiert und gegeneinander abgewogen.

Anstelle eines möglichen Defizitausgleichs mittels Nutzung kostenintensiver Mikrolinsenarrays fand die Nutzung von Integrationskugeln Priorisierung. Im Zuge der Konzeptionierung wurde eine modifizierte Ulbricht'sche Kugel entworfen und aufgebaut, in welche der optische Ausgang des Flüssiglichtleiters eingekoppelt wurde. Während der Bestimmung der geometrischen Maße fand ein stetiges Abwägen zwischen den Kriterien Kugeldurchmesser und Reflexionsverlustfläche statt. Je größer die Kugelöffnung zur Stimuluspräsentation ist, desto mehr wird die integrale Eigenschaft der U-Kugel beeinflusst. Für den Versuchsaufbau fand eine Halbkugel mit einem Durchmesser von 50cm der Firma LMT Verwendung. Die zweite Halbkugel wurde aus Gips aufgebaut und so modifiziert, dass ein Kugelstumpf von $d_1=50$ cm und $d_2=20$ cm übrig blieb. Anschließend erfolgte die Glättung der Halbkugelninnenseite mit Sandpapier und Stahlwolle, um in folgenden Schritten eine spektral gleichmäßig reflektierende Substanz aufzutragen. Gips hat die Eigenschaft, aufgetragenen Substanzen auf Wasserbasis dieses zu entziehen und Risse zu bilden. Dieser Überlegung folgend wurde die Innenseite der Gipshalbkugel mit einem gleichmäßig aufgetragenen, matten Speziallack versehen.

Erfüllung der geforderten spektralen Eigenschaften wird durch Nutzung spektral neutral reflektierender Substanzen wie Halon, Spektralon oder auch durch Metalloxide, beispielsweise Bariumsulfat (BaSO_4), erreicht. Ein Vergleich der spektralen Reflexionseigenschaften ist in Abbildung 35 und Abbildung 36 zu finden.

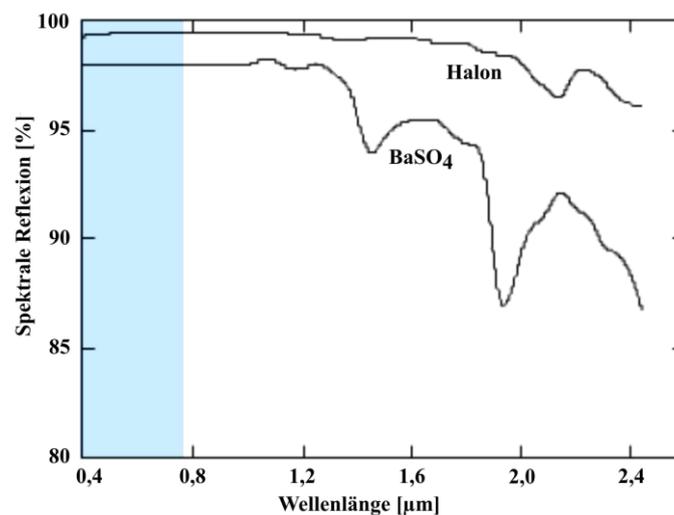


Abbildung 35: Spektrale Reflexionseigenschaft von Halon und reinem Bariumsulfat (BaSO_4) (blauer Bereich: 400nm-780nm) [mod. nach AG3]

Da gepresstes BaSO_4 nicht auf die Kugeloberfläche aufzubringen ist, fand eine auf Wasser- und Polyvinylalkohol basierte Lösung Anwendung. Entsprechend ergeben sich Unterschiede im Reflexionsverhalten und in der Haltbarkeit. Diese sind in folgender Abbildung gegenübergestellt, jedoch als marginal anzusehen. Das Mischverhältnis und die Verarbeitungsprozedur sind einer Anweisung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) für die Herstellung von Photometerkugelninnenschichtungen entnommen [vgl. NIKOLAUS 1980] (Anhang – Kapitel 5).

Die geometrischen Bestimmungen berücksichtigend, befindet sich die anschließend zusammengesetzte Kugel in einem Abstand von $s=114,5$ cm vor dem durch eine Kinnstütze fixierten Probanden, um die stimulierten Netzhautgrößen von $\alpha=10^\circ$ sowie $\alpha=1,25^\circ$ mittels BaSO_4 beschichteter Blende darzustellen. Der Blendenlochdurchmesser beträgt 2,5 cm. Für die Versuchsreihen mit $\alpha=64^\circ$ befindet sich der Probandenplatz in $s=16$ cm vor der Präsentationsfläche. Zur Überprüfung wurde mit der Leuchtdichtemesskamera die orts aufgelöste Leuchtdichteverteilung gemessen.

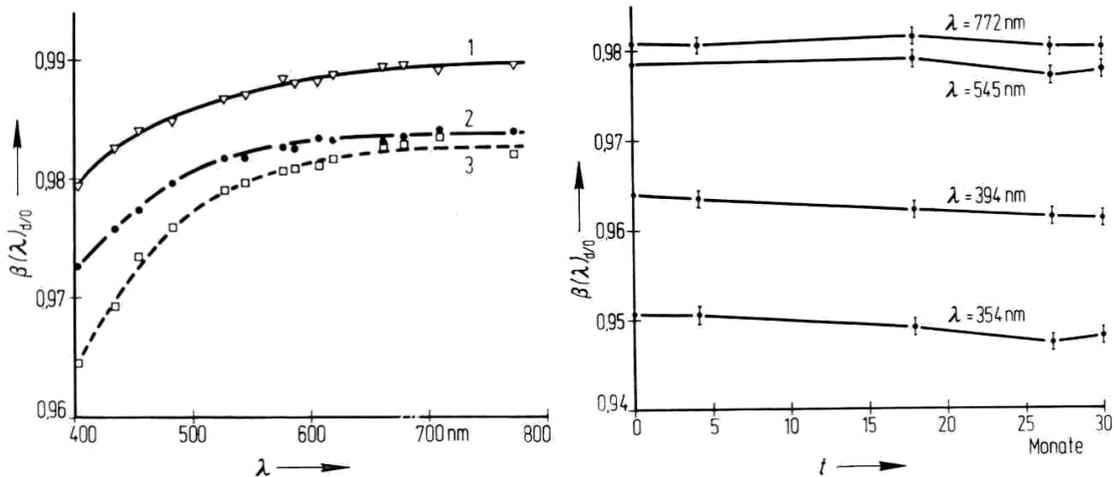


Abbildung 36: Spektrale Reflexionseigenschaften und deren zeitliche Konstanz von Bariumsulfat (links: spektraler Strahldichtefaktor $\beta(\lambda)_{d/0}$ über die Wellenlänge λ , 1: reiner BaSO₄-Pressling, 2 & 3: BaSO₄ mit unterschiedlichem Polyvinylalkoholzusatz; rechts: Abhängigkeit des spektralen Strahldichtefaktors $\beta(\lambda)_{d/0}$ bestimmter Wellenlängen λ über die Zeit t) [ERB 1975]

Abbildung 37 zeigt die Leuchtdichteverteilung über die Projektionsfläche bei maximaler Aussteuerung des OL 490 mit einem Spalt von 350 μm . Im unteren Bildabschnitt ist der Leuchtdichteschnitt der eingezeichneten Auswertungsregion 1 dargestellt. Die zwei äußerst schmalen Einschnitte entstehen durch eine an der Rückseite angebrachte und verschlossene kreisförmige Öffnung und gehen nicht in die Bewertung der Leuchtdichtehomogenität ein. Im Zuge des späteren Versuchs dient der Kreis zur Fixation der Blickrichtung des Probanden. Bezüglich des erhaltenen Datensatzes sind die Min/Max Abweichungen der vorkommenden Leuchtdichten in Tabelle 9 ausgewertet. Als Minimalwert für die Auswertungsregionen dient der Wert bei $L=121 \text{ cd/m}^2$. Die kreisförmige Auswertungsregion wird mit Nummer 2 benannt.

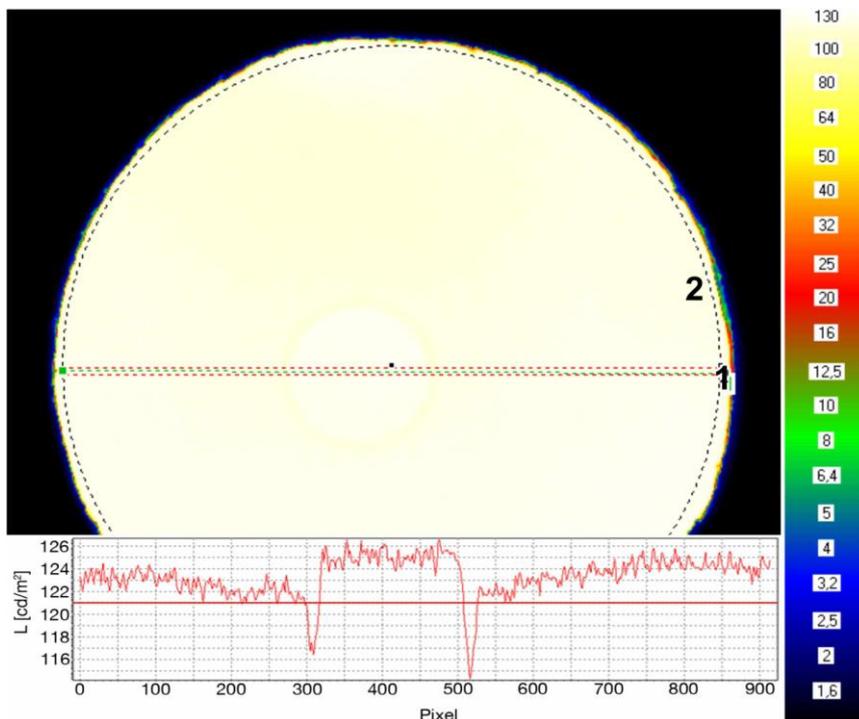


Abbildung 37: Leuchtdichteverteilung der Stimulusprojektionsfläche (rote Linie: $L=121 \text{ cd/m}^2$)

Region	L_{\min}	L_{\max}	ΔL
1	121cd/m ²	126,8cd/m ²	-4,57%
2	121cd/m ²	129,4cd/m ²	-6,49%

Tabelle 9: Minimale und maximale Leuchtdichten und deren Abweichung

Durch das OL 490 besteht die Möglichkeit einer wellenlängengenauen Spektrenansteuerung, welche anschließend Präsentation im vorhandenen Projektionsaufbau findet. Zur Gewährleistung einer konstanten Projektion des erzeugten Spektrums ist die Integrationskugel mit einer spektral neutral reflektierenden Schicht ausgekleidet. Zur Prüfung der angestrebten Eigenschaften wurden zehn Spektrallinien ($\lambda_{\text{HWB}}=5 \text{ nm}$) im Wellenlängenbereich von 385-780 nm erzeugt und mittels des Spektroradiometers OL770 vermessen. Insgesamt sind mehrere Anpassungsschritte einer Wellenlängenkalibrierung nötig, um eine minimale Abweichung der programmierten zur gemessenen Wellenlänge zu erreichen. Zur Bestimmung der spektralen Homogenität über die Präsentationsfläche wurde eine Vermessung an vier Punkten durchgeführt.

Eingestellte Wellenlänge	385	400	450	500	555	600	650	700	750	780
$\lambda_{P1} [\text{nm}]$	384,78	400,15	450,72	501,08	556,06	600,77	650,52	699,68	749,46	778,3
$\lambda_{P2} [\text{nm}]$	385,17	400,15	450,72	501,08	555,61	600,77	650,52	699,68	749,46	778,3
$\lambda_{P3} [\text{nm}]$	384,78	400,15	450,72	501,08	555,61	600,77	650,52	699,68	749,46	778,3
$\lambda_{P4} [\text{nm}]$	385,17	400,15	450,72	501,08	555,61	600,77	650,52	699,68	749,46	778,3
$\Delta_{\max} [\text{nm}]$	-0,22	0,15	0,72	1,08	1,06	0,77	0,52	-0,32	-0,54	-1,7

Tabelle 10: Maximale Abweichung der gemessenen zur programmierten Wellenlänge des Forschungsaufbaus an vier Messpunkten P1-P4 der Kugel und Δ_{\max} nach Wellenlängenkalibrierung des OL490 anhand o.g.Referenzwellenlängen (OL 490 Lichtquelle Nr. 3)

Zielsetzung für die jeweilige Kalibrierung ist das Unterschreiten einer maximalen Abweichung von $\lambda=\pm 1 \text{ nm}$. Bezüglich der berechneten Abweichung ist dieses Kriterium über den betrachteten Wellenlängenbereich zum Großteil erfüllt. Zieht man den Verlauf der bisher existierenden Empfindlichkeitsfunktionen hinzu, bekommt die Abweichung bei $\lambda=780 \text{ nm}$ nur geringe Bedeutung. Eine Wellenlängenkalibrierung ist bei jedem Lampenwechsel sowie bei einer gegebenenfalls notwendigen Demontage des OL 490 durchzuführen. Entsprechend der gegebenen räumlich spektralen Genauigkeit kann dies anhand eines Messpunktes durchgeführt werden. Neben der Realisierung eines genauen spektralen Abbilds durch den Forschungsaufbau ist eine Veränderung des projizierten Spektrums über die Intensitätsänderung (Stimulistufen) zu vermeiden. Diesbezüglich wurden Messungen bei einer Reduktionsrate von 0 %, 50 % und 90 % der in Tabelle 10 aufgeführten Spektrallinien durchgeführt. Nach der Datenauswertung erhobener Messreihen kann kein spektraler Versatz in Abhängigkeit der Spiegelzeilenansteuerung und damit der Intensität festgestellt werden.

In Abbildung 38 ist der verwendete Forschungsaufbau gezeigt. Der Versuchsstand selbst befindet sich in einem Dunkellabor. Im linken Bild ist die Integrationskugel und die durch den Kugelstumpf bestimmte Präsentationsöffnung zu sehen. Davor befindet sich eine Blendenhalterung, mit welcher die Stimulusgröße von $\alpha=1,25^\circ$ realisiert wird. Weiterhin ist die Einkopplung des Flüssigkeitslichtleiters hervorgehoben, welche möglichst tangential zur Kugelkrümmung verläuft. Dadurch ist die an der Kugelinnenfläche auftretende beleuchtete Fläche gering und bleibt in dem nicht sichtbaren Bereich des Probanden.

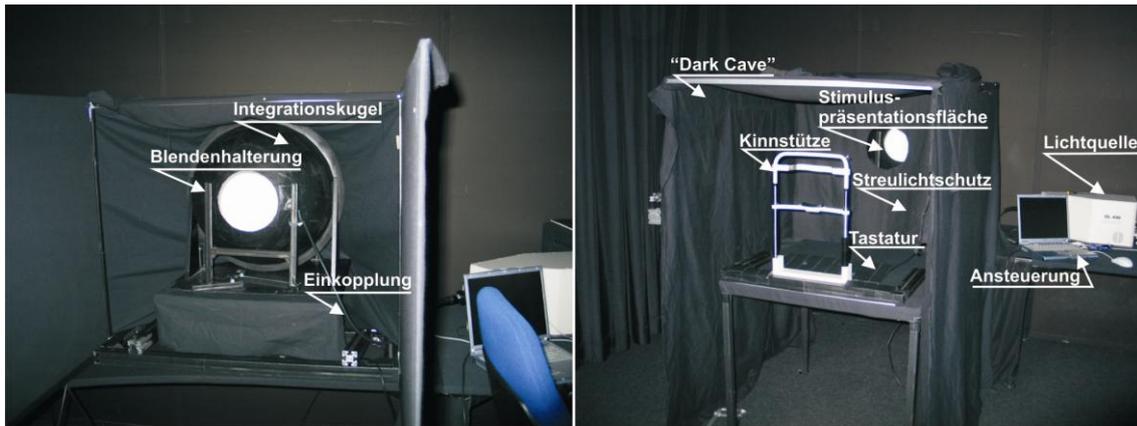


Abbildung 38: Hauptelemente des verwendeten Forschungsaufbaus

Die Präsentationskugel ist erhöht platziert. Somit ist eine orthogonale Reizdarbietung zum Auge des Probanden möglich. Aufgrund des aus der Lichtquelle selbst austretenden Restlichts ist der Probandenplatz nochmals durch eine „Dark Cave“ isoliert. Zur Fixierung des Kopfes befindet sich eine Kinnstütze direkt vor dem Sitzplatz. In deren Front befindet sich eine modifizierte schwarze Tastatur mit zwei bis drei Tasten. Je nach Methode hat der Proband die Möglichkeit die Strahldichte und damit die Hellempfindung zu steuern und ggf. die Referenz erneut aufzurufen. Die Versuchsdurchführung und Ansteuerung erfolgt durch den Untersuchungsleiter, rechts des Forschungsaufbaus. Damit eventuell seitlich aus der Präsentationsfläche austretendes Streulicht keinen Einfluss auf die Probandenurteile und Adaptationszustände hat, ist zwischen Proband und Integrationskugel ein Streulichtschutz angebracht.

5.3 Resultierende Anforderungen

Nach Vollendung des Forschungsaufbaus wurden umfangreiche Tests bezüglich der Systemeigenschaften und der gesetzten Anforderungen durchgeführt. Neben dem Erreichen der Strahldichten, welche für stabile Adaptationsleuchtdichten relevant sind, steht die Erzeugung eines genauen spektralen Abbildes der Stimuli im Vordergrund.

Die Ergebnisse der Messungen stellten sich als äußerst unbefriedigend heraus. Als Hauptursachen konnten die Lampendegradation sowie das nichtlineare Verhalten der durch die Spiegelansteuerung gesteuerten spektralen Strahldichten identifiziert werden. Insbesondere eine stetige Veränderung der Bezüge einzelner spektraler Anteile untereinander, in Abhängigkeit des angesteuerten Intensitätslevels, entspricht nicht den festgelegten Anforderungen. Da die zu erreichenden Leuchtdichten aller Stimuli einen großen Dynamikbereich abdecken, bestand sowohl die Herausforderung hohe Leuchtdichten zu erreichen als auch kleinste Leuchtdichten erzeugen zu können. Wird zuviel Licht in das System eingekoppelt, reichen die anzusteuernenden Spiegelstufen nicht aus, um niedrige Leuchtdichten in diskreten Abstufungen zu erzeugen und über dem Level eines Restlichtes der Modulareinheit zu verbleiben. Demgegenüber muss für die Erzeugung der Leuchtdichten über 10 cd/m^2 genug Strahlungsenergie vorhanden sein. Hinzuzufügen ist eine hinreichende Kompensation der Lampendegradation.

Erstes Testergebnis war, dass zur Erreichung der Leuchtdichtelevel der $150 \mu\text{m}$ Spalt vor der Modulationseinheit durch den $350 \mu\text{m}$ ersetzt werden musste. Dies hat eine Vergrößerung der Halbwertsbreite einzelner Spektrallinien zur Folge, wodurch jedoch eine Verdreifachung des nutzbaren Strahlungsflusses erreicht wird. Durch die Untersuchung von breitbandigen Spektren ist der aufgeführte negative Effekt nur von geringer Bedeutung.

Zur Behebung der Diffraktions- und Überlappungseffekte im Modulator wurde ein Maßnahmenkatalog erstellt, in welchem einzelne Probleme identifiziert und Lösungsansätze aufgezeigt werden. Dieser fand im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit Umsetzung (Tabelle 11). Zielsetzung war es, die Eingangs- zu Ausgangswerte der Spektren zu linearisieren, definierte Leuchtdichteniveaus anzusteuern und die Effekte der Lampendegradation zu kompensieren. Dementsprechend kommen zwei Applikationspakete zum Tragen, wobei das erste die Originalsoftware des OL 490 ersetzt und hauptsächlich die im hardwareinternen Flashspeicher liegenden Steuerfunktionen umgeht. Somit ist ein direkter Zugriff auf die DMD-Elemente möglich (Kapitel 5.4). In Kapitel 6 wird auf die umfangreiche Spektrengenerierung eingegangen, welche auf ein eigenes Softwarepaket zugreift, eine Wellenlängenzuordnung auf dem DMD ermöglicht und unter anderem für jede Spiegelspalte eigene Linearisierungsfunktionen erzeugt. Eine Übersicht ist Tabelle 11 zu entnehmen.

Applika-tionsgruppe	Problemstellung	Bemerkung / Lösungsansatz
Ansteuerung „Spectrum Generator“	Keine direkte Ansteuerung des DMD möglich	Umgehung der firmeneigenen, flashgebundenen Steuerfunktionen
	Externe Transformation von Strahldichten in Intensitätsstufen des OL 490	Umsetzung von Listenimportfunktionen, Zugriff auf komplexe Verzeichnisstrukturen
	Keine Probandensteuerung der Intensitätsstufen	Entwicklung einer Systemapplikation für Probandenversuche als Ansteuerungs- und Ausleseeinheit
	Keine Wellenlängenkalibrierung	Automatische Erzeugung von Referenzwellenlängen
	Keine Echtzeitspektrenmodifikation	Implementierung einer graphischen Spektrenüberwachung mit Echtzeitmodifikationsmöglichkeit
	Keine Ansteuerung Kommunikation mit mehreren OL 490	Umsetzung einer synchronen Kommunikationsschnittstelle für die Anwendung frequenzbehafteter Methoden
Spektrenerzeugung „SpecPack“	Nichtlinearitäten des Systems	Gegensteuerung der Lampendegradation mittels Kalibrierfaktor und daraus resultierender Berechnung und automatischer Erzeugung eines Gesamtspektrenpakets aller Stimulivariationen
		Behebung der Nichtlinearitäten mittels Linearisierungsfunktionen je DMD-Spalte
		Spektrenerzeugung auf angestrebten Leuchtdichteadaptationsniveau und daraus folgend der Stimuliintensitäten
	Zuordnung der Wellenlängenabbildung auf den DMD	Festlegung der ersten DMD-Spalte auf welcher entsprechende die Wellenlängenabbildung durch das Diffraktionsgitter stattfindet
	Datenkompatibilität mit dem OL 490	Konvertierung von spektralen Strahldichten in Intensitätsstufen unter Nutzung des „Spectrum Generator“
	Wellenlängenabhängige Beschneidung der darzustellenden Spektren infolge des Primärspektrums	Einmalige Bestimmung der Beschneidung der Spektren am kurz- und langwelligen Ende des visuellen Bereichs zur Ausstanzung aus dem Spektrum der Primärlichtquelle und zum Erreichen der Stimulusleuchtdichten

Tabelle 11: Anforderungen an eine zu entwickelnde OL 490 Ansteuerung und Spektrengenerierung

5.4 Ansteuerung

Für die Steuerung der einzelnen Spiegel ist es notwendig, statt der mitgelieferten Standardsoftware eine eigene Schnittstelle zu programmieren. Mittels des existierenden Software-Development-Kit (SDK) und entsprechendem Command Set (CS) wurden in der objektorientierten Programmiersprache C# die geforderten Funktionalitäten aus Tabelle 11, Applikation 1 (Spectrum Generator) umgesetzt und stehen dem Anwender unabhängig voneinander zur Verfügung. Im weiteren Verlauf dieser Forschungsarbeit erweist sich die Nutzung der Funktionen „Wavelength Calibration“, „DMD-Control“ und „Proband Version“ als unumgänglich.

Die Funktion „Wavelength Calibration“ bildet eine Grundfunktion für die Ausrichtung der Spaltöffnung der OL-Lichteinheit zum Modulatoreingang. Entsprechend der in Tabelle 10 aufgeführten Wellenlängen wird eine automatische Liste erzeugt und an das OL 490 gesendet. Parallel erfolgt die Vermessung der dargestellten Signale mit dem Spektroradiometer. Aus der erzeugten und gemessenen Wellenlänge kann die jeweilige Abweichung berechnet werden und durch iterative Variation der Spaltposition ist eine Wellenlängenkalibrierung durchführbar.

Erweiternd dazu existiert die direkte Ansteuerung der DMD-Matrixelemente durch Nutzung der „DMD-Control“-Funktionalität. Neben dem Einlesen von berechneten spektralen Verteilungen durch Listen, bestehend aus Intensitätsstufen (0-49152) und Spaltenkoordinaten (0-1023 a 0,4 nm), ist auch die Zusammenstellung einzelner Spektren möglich. Um festzustellen, ab welcher Spiegelspalte das spektral zerlegte Primärlicht des Diffraktionsgitters auf die DMD-Spalten abgebildet wird, hat es sich als empfehlenswertes Vorgehen erwiesen, Spektralkämme bestimmter Wellenlängenabstände zu erzeugen. Diese sind im jeweils gewählten Abstand der Wellenlängen zueinander mit der Schrittweite von 0,4 nm zu verschieben. Liegt beispielsweise ein Spektralkamm von 380-780 nm in 10 nm Schrittweite vor, ist dieser um jeweils 0,4 nm (25 mal), somit einer Spiegelspalte entsprechend, zu verschieben. Alle Spiegelspalten, welche keine spektral programmierbaren Strahldichten aufweisen, sind für eine Spektrenprogrammierung mit der Intensitätsstufe 0 zu versehen. Daraus resultierend wird das im System hervorgerufene Restlicht minimiert. Für weitere Anwendungen steht eine graphische Darstellung des aktuell programmierten Spektrums und eines durch Drag & Drop modifizierbaren Spektrums zur Verfügung (Abbildung 39).

Als wichtigstes Bedienelement zur Durchführung von Probandenversuchen stellt sich die implementierte Funktion der „Proband Version“ dar. Prinzipiell unterteilt sich diese in drei Hauptbereiche des Graphical User Interface (GUI). In die linke Tabelle erfolgt das Laden eines Spektrums als Listenelement und dient als Referenz. Im mittleren Eingabefeld besteht die Möglichkeit, referenzierte Dateien über eine Setupdatei einzulesen. Diese werden unmittelbar darauf im rechten Abschnitt der Benutzeroberfläche, in Form von Einstellstufen, angezeigt. Überdies sind diese ansteuerbar und bilden die jeweilig wählbare Helligkeitsstufe eines Spektrums durch den Versuchsleiter sowie nach Freigabe des Probanden ab.

Die bei den Probandenversuchen genutzte Interaktionsoberfläche weist darüber hinaus die Möglichkeit auf, einen Shutter in den Strahlengang einzuführen. Für die Methodenanwendung des MBM ist nach einem erfolgten Abgleich und vor Umschaltung auf die erneute Adaptationsreferenz der Shutter kurzzeitig zu schließen. Es wird dem Probanden suggeriert, immer den bestmöglichen Abgleich gemacht zu haben. Bei Einstellung der Hellempfindung durch die SBBM-Methode ist die Möglichkeit einer wiederkehrenden Referenzdarbietung gegeben. Diesbezügliche Angaben liefert ein inkrementeller Zähler im unteren Bereich der „Proband Version“. Zur Kontrolle der Adaptations-, Abgleichs- und Readaptationszeit ist eine Stoppuhr nutzbar (oben rechts).

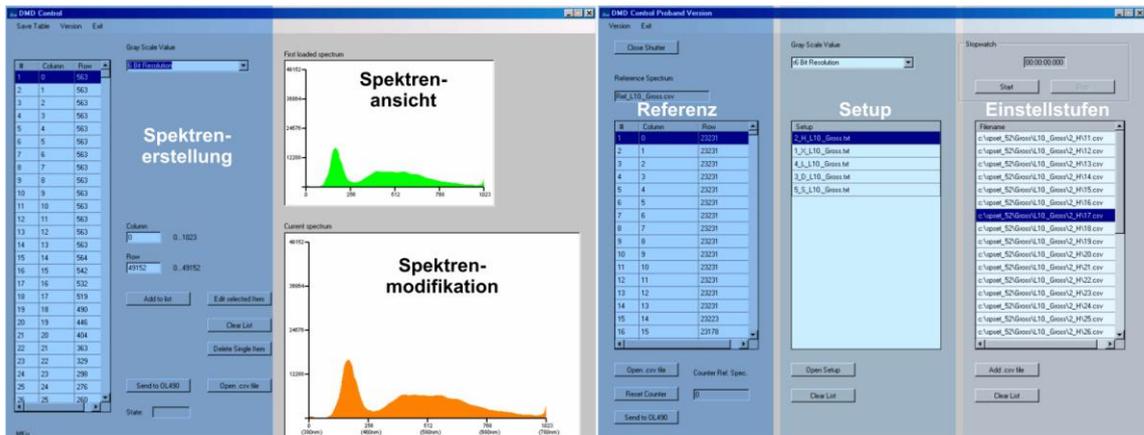


Abbildung 39: GUI des "Spectrum Generator" und deren Funktionalitäten (links: "DMD Control"; rechts: "Proband Version")

KAPITEL 6

REALISIERUNG DER STIMULI

Im letzten Schritt zur Realisierung spektral identischer Reize, exakt ansteuerbarer Leuchtdichteadaptationsniveaus und Stimulileuchtdichten sind mehrere einander beeinflussende Faktoren abzuwägen. Es werden bestmögliche Kompromisse geschlossen, um ein allen Anforderungen gerechtes Versuchsdesign zu gewährleisten. Es wird eine umfassende, äußerst komplexe Kalibrierarbeit geschildert.

Grundsätzlich müssen zeitvariable Faktoren des Systems, wie die Lampendegradation, sowie zeitlich konstante Faktoren, begrenzt auf die jeweils zum Einsatz kommende Primärlichtquelle, Beachtung finden. Zunächst ist den dem System kontinuierlich anhaftenden Nichtlinearitäten im spektralen Input/Output-Verhalten mittels Linearisierungsfunktionen zu begegnen. So kann gewährleistet werden, dass die spektrale Zusammensetzung und die Proportionen des zu simulierenden Originalspektrums erhalten bleiben. Darauf aufbauend ist je nach spektraler Verteilung, zu erreichenden Leuchtdichten, etc. eine Abstimmung bezüglich der simulierten Spektrengüte zum Original, der Nutzungsdauer und vielem mehr nötig. Dies ist ein iterativer Prozess, welcher beliebig oft, entsprechend der gewünschten Ausgabequalität der Stimuli, durchgeführt werden kann.

Bedingt durch den enormen Aufwand und Umfang einer Kalibrierung sowie die Auswirkung der zeitlich variablen Faktoren auf die zu erzeugenden Stimuli wurde die Entwicklung eines Programms zur weitgehenden Automatisierung der Kalibrierung und der Spektrensetzerzeugung je Versuchsdurchgang vorangetrieben. Die entsprechenden Funktionalitäten werden durch das MATHEMATICA-Programm „SpecPack“ bedient, dessen Ablauf in Kapitel 6.2 systematisch erläutert ist.

Im dritten Teil dieses Abschnitts sind die in den Hauptversuchen, unter Verwendung der dritten Lichtquellenkalibrierung, als Stimuli genutzten spektralen Verteilungen dargestellt und eventuelle Abweichungen beschrieben.

6.1 Linearisierung und Kalibrierung

Ein wichtiger Aspekt für die Verwendung der programmierbaren Lichtquelle ist die Erzeugung einer genauen Simulation des Originalspektrums. Entsprechend dem Umfang der zu erzeugenden Leuchtdichten muss eine Konstanz der wellenlängenspezifischen Zusammensetzung und deren relativer spektraler Energieanteile für jedes Stimuluslevel gegeben sein. Während das Simulieren schmalbandiger spektraler Verteilungen und angestrebter Strahldichten als einfach zu bezeichnen ist, stellt sich demgegenüber eine erhöhte Komplexität für breitbandiges Licht dar. Im Zuge der Integration des OL 490 in den Forschungsstand fanden umfangreiche Versuche zur Spektrenerzeugung und zu deren konstanter Wiedergabe über verschiedene Leuchtdichtelevel statt. Diesbezüglich wurden Kontrollmessungen des Spektrums und der Leuchtdichte (Umrechnung in Intensitätslevel des OL 490) durchgeführt. Dadurch konnten verschiedene einflussnehmende Faktoren identifiziert werden, welche eine originalgetreue Spektrensimulation nicht trivial erscheinen lässt. Zeitvariable Faktoren sind in der Regel beständig nachzuregulieren, zeitkonstante Faktoren lassen sich durch eine einmalige Kalibrierung je Primärlichtquelle beheben. In Abbildung 40 sind die Faktoren und deren Effekte dargestellt.

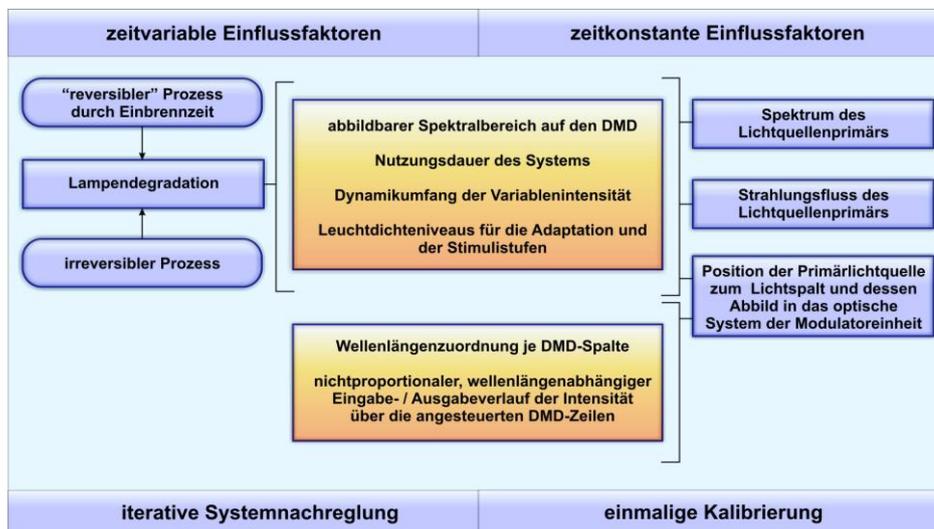


Abbildung 40: Einflussfaktoren und deren Effekte auf die Spektrenerstellung mittels OL 490

Um die Erstellung der simulierten Spektren und die Implementierung der Korrekturfunktionen zur Behebung ungewollter Einflussfaktoren verstehen zu können, ist es wichtig, sich die allgemeine Signalerzeugungsprozedur des OL 490 anzusehen. Grundsätzlich kann man die Generierung eines Spektrums mit dem Vorgang eines Ausstanzens mittels Formbogen vergleichen. Das zur Verfügung stehende Ausgangsspektrum, das Primär, wird durch die Primärlichtquelle vorgegeben (vgl. Abbildung 41). Durch die Programmierung der DMD-Matrix wird die Stanzform festgelegt. Jede Spektrallinie, abgebildet durch das angesteuerte DMD-Element, welches über dem spektralen Verlauf des Primärs liegt, wird mit dem Primärmaximum dieser Wellenlänge versehen, nimmt dessen Form an und ist nicht weiter zu modellieren. Spektrale Anteile innerhalb des Primärs, auch jene anschließender Intensitätsminderung, werden in der Form des Stanzbogens wiedergegeben. Da das Primär sämtliche simulierbaren spektralen Verteilungen determiniert, stellen dessen Intensitätswerte die Bezugswerte für das zu simulierende, also auszustanzende Spektrum dar. Generell ist für die Erzeugung eines simulierten Spektrums zunächst das Primär bei Vollaussteuerung (all mirrors on) zu vermessen und anschließend zu normieren. Gleiches gilt für jegliches zu simulierendes Spektrum. Liegen beide spektrale Verteilungen vor, ist ein Verhältnis der spektral normierten Werte zu bilden. Bis auf geringfügige Abweichungen stimmt das Spektrum der Xenon-Höchstdruck-Lampe auch bei deren Wechsel überein. Die Po-

sition des Lichtspaltes und in dessen Folge die spektral aufgelöste Abbildung auf dem DMD bedingt den spektral ansteuerbaren Bereich. Es besteht die Möglichkeit, beispielsweise erst die achte Spiegelspalte mit der ersten Wellenlänge des zerlegten Spektrums zu beleuchten. Durch diese horizontale Verschiebung und die Spiegelbreite von 0,4 nm ergibt sich ein spektraler Versatz von 3,2 nm. Ist es Ziel, ein breitbandiges Spektrum zu simulieren, welches 380-780 nm abdeckt, ist zuerst festzustellen, wie sich die spektrale Verschiebung verhält. Daraus resultierend ist eine spektrale Abbildung um acht Spiegelspalten zu reduzieren oder zu versetzen.

Weiterhin gilt die Zielsetzung, eine originalgetreue spektrale Nachbildung zu erschaffen. Fehler aus einem etwaigen Abschnitt des zu simulierenden Spektrums aufgrund der Tatsache, dass dieses die Spektralanteile des Primärs überschreitet, sind nicht tolerierbar. Je nach Anforderung ergeben sich zwei Lösungsmöglichkeiten. Zum einen kann der spektrale Maximalwert des zu erzeugenden Spektrums unter dem jeweiligen Intensitätswert der primären Verteilung liegen. Dies hat den Effekt, dass unter Umständen nur sehr geringe Strahldichten erzeugt werden. Zum anderen ist es diskutabel, auf Kosten der Abbildungstreue die Randbereiche des zu erzeugenden Spektrums zu beschneiden und dieses somit in höhere Intensitätsbereiche des Lampenprimärs zu schieben. Vergleichend zu den existierenden spektralen Empfindlichkeitskurven ist dies als ein praktikables Vorgehen einzustufen.

Einschränkungen bezüglich der Nutzungsdauer ergeben sich sowohl durch die Wahl der zu erreichenden Leuchtdichten als auch durch den Strahlungsfluss der neuen Lampe und deren Positionierung vor dem Spalt der Lichteinheit. Im Hinblick auf die Ausgangsleistung der Lampe könnte der Schluss entstehen, dass, je höher diese ist, eine bessere Spektrensimulation gegeben scheint. Insbesondere für das vorliegende Forschungsdesign trifft dies nicht zu. Bei zu großer Ausgangsleistung sind die Spiegelzeilen soweit zu reduzieren, dass sich niedrige Intensitäten kaum abbilden lassen. Gleiches gilt für einen hohen Dynamikumfang. Je mehr Spiegelemente für das Erreichen eines bestimmten Intensitätsniveaus genutzt werden, desto weniger stehen für die Realisierung kleiner Änderungen zur Verfügung.

Die prinzipielle Funktionsweise der Modulatoreinheit liegt den Schluss einer proportionalen Signalverarbeitungsweise nahe. Werden 50 % der DMD-Spiegelzeilen abgeschaltet, sinkt die Intensität des Signalausgangs entsprechend um die Hälfte. Jenes durch das Diffraktionsgitter erzeugte Spektrum folgt jedoch keinem linearen, sondern einem nichtlinearen Verlauf, wobei bei Intensitätssenkung immer zuerst die äußeren Spiegelzeilen einer Spalte zur Mitte hin reduziert werden. Im Hinblick auf die Erstellung komplexer Spektrenabbildungen ist eine Korrektur des Input/Output-Verhaltens durchzuführen.

Für eine entsprechende Korrektur, als Teil einer einmaligen Kalibrierung je Lampeneinheit, ist eine Linearisierung der Intensitätsansteuerung nötig. Da es sich bei der Modulationseinheit um ein hardwarebasiertes System handelt, ist der Umweg über einen softwarebasierten Ansatz zu wählen. Es gilt die Zielsetzung, dass über die Herbeiführung kontrollierter Veränderungen am Originalspektrum die systeminternen Nichtlinearitäten ausgeglichen werden, bis das simulierte Spektrum am Ausgang des OL 490 mit der ursprünglichen spektralen Verteilung bestmöglich übereinstimmt. Ausgehend von der schon aufgezeigten spektralen korrekten Möglichkeit der Zuordnung zu den Spiegelspalten sowie deren auftretender Konstanz bei Intensitätsveränderungen ist ein zu erfolgreicher Ausgleich der Nichtlinearitäten auf die Spiegelreihen und deren Modulation beschränkt. Bei erfolgten Messungen von Spektrallinien mit Wellenlängenversatz (Spektralkämme) und unterschiedlichen Intensitätsstufen wurde ein abhängiges Verhalten der nichtlinearen Input/Output-Verhalten je Wellenlänge festgestellt. In Berücksichtigung der zu betrachtenden breitbandigen spektralen Verteilungen kann auf eine Vermessung der Systemant-

worten für jede Spiegelspalte verzichtet werden. Stattdessen hat es sich als sehr praktikabel erwiesen, das Vollspektrum der Primärlichtquelle spektral aufgelöst zu vermessen. Besondere Bedeutung bekommt dieses beschleunigte Verfahren im Hinblick auf den Aspekt der Lampendegradation. Je länger eine Kalibrierung andauert, desto größer werden die Unterschiede über die Gesamtprozedur.

Hinsichtlich der Vermessung von Systemantworten wurde das Spektroradiometer OL 770 genutzt, welches wie die programmierbare Lichtquelle eine Wellenlängenauflösung von 0,4 nm besitzt. Für eine Abbildung des zur Verfügung stehenden Dynamikbereichs des Systems wurde das Spektrum des Primärlichts um je fünf Prozent in der Intensität reduziert. Es standen somit 21 Primärspektren für die anschließende Vermessung zur Verfügung. Diese wurden mittels der Funktion DMD-Control nacheinander in das OL 490 eingegeben und anschließend vermessen. Nachstehend sind die spektralen Intensitätsverläufe der beim Hauptversuch eingesetzten Lampe dargestellt.

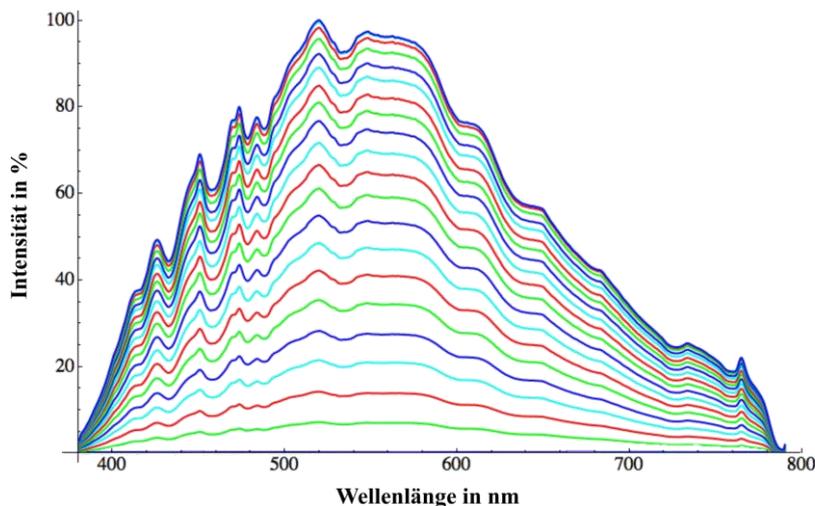


Abbildung 41: Gemessene relative spektrale Intensitäten des Lichtquellenprimärs bei 21 Abstufungen (5% Abstufungen folgen der blauen, türkisen, roten und grünen Einfärbung)

Bereits aus der Darstellung in Abbildung 41 ist ersichtlich, dass die Systemantworten der programmierten oberen Intensitätslevel dichter benachbart sind als bei niedrigen Niveaus. Weiterhin ist festzustellen, dass das gemessene Spektrum des programmierten 95 % Niveaus kaum von der vollen Leistung zu unterschieden ist. Hinzuzufügen ist, dass bei einer Vermessung des Vollspektrums und einer Ansteuerung ohne Intensität der Restlichtstrom im System gemessen wurde und für die kommenden Verarbeitungsschritte Verwendung fand.

Insgesamt stehen nun für jede Spiegelspalte 21 gemessene Strahldichten und nach Normierung deren Intensitätswerte zur Verfügung. Für das weitere Vorgehen ist für jede der 1024 vorhandenen Wellenlängen eine Paarung der Intensitätsansteuerungswerte zum jeweiligen Intensitätsmesswert zu erzeugen. Zur Gewinnung der korrigierten Zielwerte an den betrachteten spektralen Stützstellen ist eine Umkehrfunktion zu bilden, welche sich durch eine Spiegelung an der ersten Winkelhalbierenden durchführen lässt. Durch kubische Interpolation sind Zwischenpunkte für ein anschließendes Fitting zu generieren, welches im finalen Schritt für jede Wellenlänge eine Linearisierungsfunktion erzeugt. Einen Auszug der 1024 Linearisierungsfunktionen zeigt Abbildung 42. Klar ersichtlich sind ähnliche Funktionsverläufe, jedoch auch Unterschiede im wellenlängenabhängigen Intensitätsoutput.

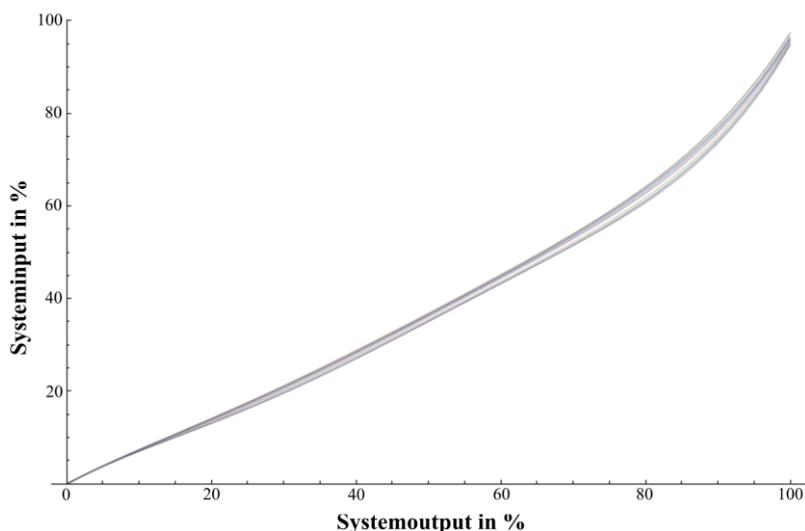


Abbildung 42: Beispiele für Linearisierungsfunktionen über den Gesamtbereich der Intensitätsreglung (dargestellter Wellenlängenbereich 500-600 nm, 10 nm Schrittweite)

Mit Erzeugung der polynomialen Linearisierungsfunktionen ist eine generelle Kalibrierung abgeschlossen. Jede spektrale Strahldichte eines Spektrums kann nun ausgeglichen werden, wodurch die relativen Bezüge bei Leuchtdichteänderungen zueinander gleich bleiben.

6.2 Einstellung der Stimulleuchtdichten und Automatisierungsprozesse

Durch die im vorherigen Abschnitt behandelten Schritte zur Erstellung der Linearisierungsfunktionen ist die Wiedergabe originalgetreuer Spektren möglich. Einschränkend gilt dies vorerst nur für eine definierte Leuchtdichte. Für das angestrebte Versuchsdesign werden jedoch sowohl unterschiedliche Leuchtdichtelevel zur Adaptation als auch eine variable Regelung der Abgleichstufen je nach Forschungsmethode gefordert. Zu der Spektrenerzeugung addiert sich somit die Beibehaltung der relativen Intensität der einzelnen Wellenlängen über die Skalierung des Spektrums in seiner Gesamtheit durch die Erstellung von Dimmungsfunktionen.

Grundlage für die Erstellung der Dimmungsfunktionen ist die Festlegung der maximal zu erreichenden Leuchtdichte. Diese bestimmt die spektralen Eigenschaften der Stimuli. Wie schon in den letzten Kapiteln erläutert, können nur Spektren dargestellt werden, welche innerhalb der spektralen Verteilung des Primärs liegen. Dazu ist für jede Spiegelspalte, ergo Wellenlängenanteil, das Verhältnis des zu erzeugenden Signals zum Primär zu bilden. Beide müssen normiert vorliegen, werden mit der jeweiligen Linearisierungsfunktion korrigiert und mittels Multiplikation der maximalen Spiegelquantisierung in ein Ansteuerungssignal für das OL 490 umgewandelt. Es bestand die Zielsetzung, einmal erstellte Spektren auch bei einem Lampenwechsel weiter nutzen zu können, damit eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse möglich ist. Entsprechend des gewählten maximalen Leuchtdichteadaptationsniveaus von 10 cd/m², einem Bereich von $\pm 60\%$ der Adaptationsleuchtdichte, in welcher eine Stimulusreglung des Probanden erfolgen sollte, einer möglichst langen Nutzungsdauer der Lichtquelle und der Prämisse einer möglichst geringen Spektrenbeschneidung wurde die zu erreichende Mindestleuchtdichte des Forschungsstandes zur Erfüllung der genannten Kriterien auf $L=26$ cd/m² festgelegt. Mit einer Lampendegradation von 1 % je Stunde würde dies eine Arbeitszeit von ca. 40 Stunden zulassen. Die Spektreingrenzung erfolgte jeweils von der langwelligen und kurzwelligen Seite. Näheres dazu im Anhang und in Kapitel 6.3.

Die Erstellung der Dimmfunktionen erfolgte analog zu jener der Linearisierungsfunktionen, jedoch für jedes zu erzeugende Spektrum individuell. Orientiert wurde sich an festgelegten Leuchtdichtemaxima jedes Spektrums und weiterführend an einigen Leuchtdichtestützstellen innerhalb des abzubildenden Leuchtdichtebereichs bei gewählten Intensitätsstufen. Den vorliegenden Anwendungsfall betrachtend, ergaben sich daraus für jedes Spektrum auswertbare Wertepaare, bestehend aus einem Einstellfaktor (Intensität) des OL 490 und einer gemessenen Leuchtdichte. Verwendung findende Leuchtdichten wurden mittels Leuchtdichtemesskamera LMT 1009 aufgenommen und stichprobenhaft durch erhobene Werte der LMK 98/3 und des OL 770 überprüft. Die Werte zeigten eine ausgesprochen gute Übereinstimmung. Mittels der entstandenen Interpolationsfunktionen sind die zu simulierenden Spektren mit einer Genauigkeit von 5 % zu generieren. Bereits in dieser Phase ist es möglich, hinreichend gute Zielleuchtdichten zu generieren. Indem eine weitere Iteration durch Nutzung der nun einstellbaren Leuchtdichten durchgeführt wurde, konnten genauere Dimmfunktionen erstellt werden, welche es im Ergebnis erlauben, Leuchtdichten für einige Spektren über den gesamten Darstellungsbereich von unter 3 % Abweichung darzustellen. Die Durchführung weiterer iterativer Prozesse wäre zwar möglich, würde aber den jeweiligen Kalibrierprozess unnötig verlängern und eine Erhöhung der Unsicherheit durch die parallel erfolgende Lampendegradation begünstigen.

Nachdem die Leuchtdichtewerte der einzelnen Spektren sehr genau eingestellt werden können, besteht die Maßgabe, dies zu jeder Zeit und auch unter Abnahme des nutzbaren Strahlungsflusses der Xenon-Höchstdruck-Lampe zu gewährleisten. Hierzu ist ab erfolgter Kalibrierung über die Linearisierungsfunktionen und die Dimmfunktionen ein Leuchtdichtewert aufzunehmen und als Referenzwert zu nutzen. Infolge dessen symbolisiert die prozentuale Abweichung eines Leuchtdichtewerts nach Nutzungsdauer, in Bezug auf den Startwert, das jeweilige Ausmaß der Lampendegradation. Aus diesem Sachverhalt resultierend lässt sich jeweils ein Nachregelfaktor bilden, welcher durch Multiplikation mit den Spektrenausgangswerten der Kalibrierung die jeweilig neuen leuchtdichteangepassten Spektren generiert. Eine Vermessung der Startleuchtdichtewerte erfolgte immer nach einer obligatorischen Lampeneinbrennzeit von 15 Minuten. Nach Erarbeiten genannter theoretischer Überlegungen und deren schrittweiser Umsetzung erfolgte die Entwicklung eines Programms zur Automatisierung. „SpecPack“ unterteilt sich in zwei Hauptinhalte, wobei sich der erste Teil mit der Systemkalibrierung befasst und im Schwerpunkt die Verarbeitung der einfließenden spektralen Messdaten übernimmt. Der zweite Teil des Programms hat die Aufgabe, eine schnelle Erzeugung eines gesamten „SpecPack’s“ zu gewährleisten. Immer, wenn die Lampe einem Veränderungsprozess unterworfen war, musste ein komplett neues Stimuliset (spectral package) erzeugt werden.

Vorversuche ließen erkennen, dass eine Quantisierungsstufe von 3 % Leuchtdichteunterschied kaum wahrzunehmen ist. Aus diesem Fakt heraus entstehen mit der Applikation 2 für jedes der zu simulierenden Spektren (5) und für jedes der erzeugbaren Leuchtdichteadaptationsniveaus (4) programmierte Einstellstufen, welche den Probandeneinstellbereich von $\pm 60\%$, in je 3 %-Stufen unterteilen. Folglich entstehen programmierbare Spektren, welche in automatisch generierten Listen zusammengefasst sind. Durch die Verwendung einer BaSO_4 beschichteten Blende zur Variation der Stimulusgröße unterliegt der nutzbare, auszukoppelnde Strahlungsfluss der Integrationskugel zwei konstanten Zuständen. Die Einführung eines Modifikationsfaktors, berechnet aus Leuchtdichtevergleichsmessungen, macht eine Verwendung der ursprünglich erstellten Spektren möglich, verdoppelt jedoch den Aufwand in der Spektrenerzeugung. Insgesamt sind mit einem Programmdurchlauf und wie später noch ersichtlich sein wird, für einen Probandenteilversuch 1640 Spektren zu generieren und in einer einfachen, in die Ansteuerungssoftware zu ladenden Listenstruktur abzulegen.

Aufzuzeigen ist, dass dies in möglichst kurzer Zeit erfolgen muss. Durch die Berechnung des Lampendegradationskompensationsfaktors nach der Einbrennzeit sowie dessen Verwendung bei der Spektrenerzeugung entsteht ein quasistatischer Zustand, der möglichst schnell zu nutzen ist. Das entwickelte Programm benötigt dafür eine Zeit von ca. zwei Minuten. Aufgrund der vorhandenen Komplexität des Beschriebenen ist der Funktionsumfang und die Verarbeitungsschrittabfolge in Abbildung 43 in wesentlichen Punkten noch einmal dargestellt.



Abbildung 43: Übersicht zentraler Arbeitsschritte zur Spektrenerzeugung und Kalibrierung des OL 490 und Umsetzung als Automatisierung (blau: theoretischer Block, manuelle Umsetzung; orange: automatisierte Umsetzung & Beseitigung negativer Einflüsse aus Abb. 40)

6.3 Erzeugte Stimuli und deren Eigenschaften

Durch die aufgezeigten und durchgeführten Maßnahmen besteht die Möglichkeit, spektrale Abbilder (simulierte Spektren)³¹ der Originalen zu erzeugen und zudem auf angestrebte Leuchtdichten zu justieren. Durch Pretests hat sich eine infinitesimale Hellempfindungsunterscheidbarkeit zwischen zwei Leuchtdichtestufen gezeigt, wenn diese 3 % voneinander differieren. Für die Erzeugung der Spektren, welche als Stimulistufen genutzt wurden, fand eine Orientierung an jenen spektralen Verteilungen statt, welche die Leuchtdichteadaptationsniveaus bildeten. Mittels Skalierungsfaktoren erfolgte eine weitere Berechnung von 40 Stimulistufen je Spektrum. Die erzeugten spektralen Verteilungen wurden im Anschluss vermessen. Aus der sehr guten Übereinstimmung der Vorgabewerte mit den Leuchtdichtemesswerten erfolgte die Übernahme beschriebener Verfahrensweise in den Prozess der automatischen Spektrenerzeugung. Ausgehend von der notwendigen spektralen Beschneidung einiger Spektren sowie nicht zu eliminierender Systemeigenheiten, die auch als „Branding“ bezeichnet werden können, ähneln die simulierten Spektren in Grundzügen ihren Originalen. Eine perfekte Übereinstimmung konnte jedoch nicht erreicht werden. Im Anhang zu Kapitel 6 sind die fünf Originalspektren den fünf simulierten Spektren auf den Niveaus der adaptationsbestimmenden Leuchtdichten gegenübergestellt. Rot gekennzeichnet sind die Bereiche, in denen sich Abweichungen identifizieren lassen. Bereits an dieser Stelle soll betont werden, dass die später zur Anwendung kommenden Hellempfindlichkeitsfunktionen in der spektralen Bewertung erst ab Wellenlängen von $\lambda < 700$ nm Bedeutung erlangen (vgl. Abbildung 25). Bei genauer Datenauswertung ergeben sich spektralenbezogen die Fehler aus Tabelle 12.

³¹ Simulierte Spektren werden fortan mit * gekennzeichnet.

Leuchtdichte [cd/m ²]	Radiometrische Abweichung [%]					Photometrische Abweichung [%]				
	Halogen*	Xe-non*	LED*	D65*	P9K2*	Halogen*	Xe-non*	LED*	D65*	P9K2*
10,0	20,5	16,8	2,9	5,3	8,2	1,0	17,3	1,7	1,1	4,6
3,0	20,5	17,0	3,1	5,4	8,6	1,1	17,6	1,8	1,0	4,9
1,0	20,9	17,3	4,6	6,1	9,2	1,9	17,6	2,6	2,0	5,9
0,5	24,2	17,8	7,7	8,7	12,4	5,5	16,7	3,3	5,2	7,6
ΔF_{Max}	3,7	1,0	4,8	3,4	4,2	4,5	0,9	1,6	4,4	3,0

Tabelle 12: Kumulierte, prozentuale Abweichung der simulierten Spektren unter radiometrischer und photometrischer Betrachtungsweise (ΔF_{Max} : maximale Abweichung innerhalb der Spektren in Abhängigkeit des Leuchtdichteniveaus)

Ersichtlich sind die kumulierten radiometrischen und photometrischen prozentualen Fehler der spektralen Anteile einer Simulation zum Original. Ergänzt wird dies durch den Fehler ΔF_{Max} , der die maximale Abweichung der simulierten Spektren über die angestrebten Leuchtdichten darstellt. Während der radiometrische Fehler äußerst groß ausfällt, ist die Abweichung unter photometrischer Betrachtung relativ gering. Dies bestätigt die in diesem Kapitel aufgegriffene Aussage, dass Anteile, wie beispielsweise beim Halogenspektrum, welche im hohen langwelligen Spektralbereich liegen, kaum in die menschliche Hellempfindung eingehen. Gleiches gilt für stark kurzwellige Anteile unter 400 nm. Eine spektrale Beschneidung dieser Anteile oder unexakte Wiedergabe in Form von simulierten Spektren hat geringen Einfluss auf die Hellempfindung. Als wichtiger stellt sich die Betrachtung der simulationsinternen maximalen Fehler dar. Wäre der Fehler sehr groß, könnte eine untersuchungsinterne Datenvergleichbarkeit in keinem Falle gewährleistet werden. ΔF_{Max} beschränkt sich radiometrisch und photometrisch gesehen auf einem Niveau von unter 5 %, so dass eine Datenvergleichbarkeit gegeben ist. Es ist augenscheinlich, dass die höchsten Abweichungen beim niedrigsten Leuchtdichteniveau zustande kommen. Diesbezüglich lassen sich zwei Ursachen identifizieren, die geringen Anzahl an nutzbaren Spiegeln des DMD's und der zunehmende Einfluss des Systemrestlichts (Rauschen).

Die höchste Abweichung tritt bei Xenon* auf. Begründet ist dies in seiner Beschaffenheit als Linienspektrum. Durch die Verwendung des 350 μm Spalts ist die Halbwertsbreite der erzeugten Spitzen bei ca. $\lambda_{\text{HWB}}=10$ nm. Dadurch ist es nur schwer möglich, die Steilheit der Flanken detailliert zu simulieren. Beim Halogen* trat der Effekt auf, dass zur Erreichung der notwendigen Leuchtdichten ein weiter, langwelliger Bereich abgeschnitten werden musste, der aber für eine photometrische Betrachtung eine eher untergeordnete Rolle spielt. Eine Modifikation am kurzwelligen und langwelligen Ende des D65*-Spektrums gestaltete sich ebenfalls als unvermeidlich. Am besten ließ sich eine Nachbildung des LED*-Spektrums realisieren. Diesbezüglich traten weder zu beschneidende Spektralbereiche auf noch charakteristische und nicht eliminierbare Eigenschaften des Lichtquellenprimärs, wie dies beim simulierten P9K2 erkennbar ist. Trotz der sich ergebenden Schwierigkeiten wurde an der Verwendung der gewählten Spektren und Leuchtdichten aus dargelegter Relevanz vorheriger Kapitel festgehalten. Lichttechnische Eigenschaften, gemessen bei $L=10$ cd/m², lassen sich aus Tabelle 13 entnehmen.

Kernpunkt der mittels „SpecPack“ durchgeführten Automatisierung ist die Erzeugung spektraler Verteilungen zu definierten Leuchtdichten. Eine Visualisierung der Ergebnisse und deren Güte ist in Diagramm Abbildung 44 zu sehen. Am Beispiel von LED* sind die diskret anwählbaren Stufen verdeutlicht. Der spektrale Verlauf der verbleibenden Stimuli ist auf den jeweiligen Leuchtdichtehauptniveaus (adaptationsbestimmend) im Anhang zu Kapitel 6 ersichtlich.

Spektrum	Strahllichte [W/(sr·cm ²)]	Normspektralwertanteil		CRI (1-14)	CCT [K]	S/P
		x	y			
Halogen*	5,24·10 ⁻⁶	0,4368	0,4031	99,46	2993	1,54
Xenon*	3,20·10 ⁻⁶	0,3711	0,3885	67,15	4333 ^a	1,74
LED*	3,08·10 ⁻⁶	0,3357	0,3525	72,02	5371	1,90
D65*	4,95·10 ⁻⁶	0,3179	0,3327	98,15	6210	2,49
P9K2*	4,18·10 ⁻⁶	0,2530	0,3518	62,48	9661 ^a	2,88

Tabelle 13: Übersicht lichttechnischer Kennzahlen der simulierten Spektren (CRI: Colour Rendering Index für die Testfarben 1-14; CCT: Correlated Colour Temperature, ^a: liegt außerhalb des eigentlichen Gültigkeitsbereichs für Angaben der ähnlichsten Farbtemperatur [vgl. DIN 5033/8] S/P: Skotopisches/Photopisches Verhältnis)

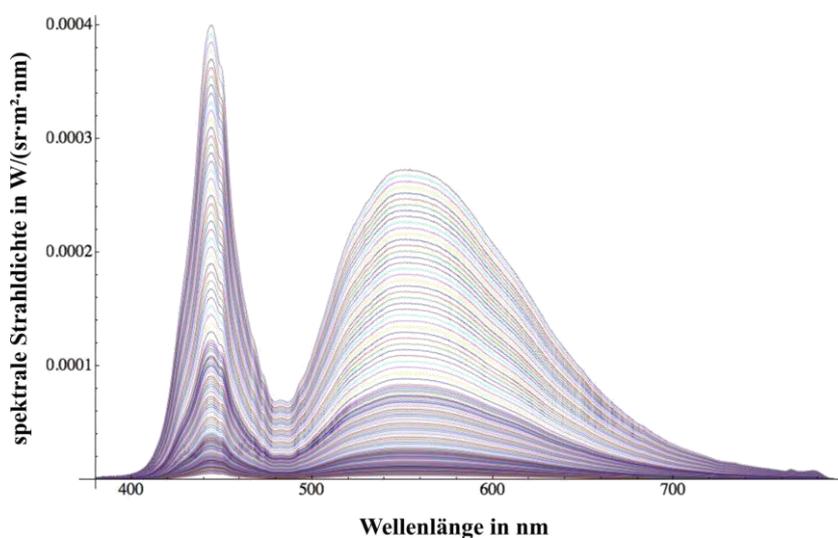


Abbildung 44: Intensitätsstufen des simulierten LED-Spektrums, durch "SpecPack" erzeugt (164 Stufen)

KAPITEL 7

BETRACHTUNG SYSTEMATISCHER EINFLUSSFAKTOREN

Erhobene Daten, ob sie aus Messungen oder empirischen Untersuchungen stammen, sind immer toleranzbehaftet. Damit Aussagen zur Güte der Daten getroffen werden können, sind Kennwerte dieser Unsicherheiten aufzubereiten.

Innerhalb des vorliegenden Themenfelds wird grundsätzlich zwischen zufälligen und systematischen Unsicherheiten unterschieden. Im Verlauf der dieser Forschungsarbeit zugrunde liegenden Experimente treten zwei Arten von Unsicherheiten auf. Ziel dieses Kapitels ist es, auf die systematischen Einflussfaktoren einzugehen und diese genauer zu beschreiben. Die durch statistische Methoden quantifizierbaren, zufälligen Fehler, werden in den jeweiligen Kapiteln der Probandenversuche behandelt.

Zusätzlich zu den zum Einsatz kommenden Messgeräten sind besonders die Unsicherheiten des Forschungsaufbaus und der Lichtquelle festzustellen und durch eine Fehlerfortpflanzung zu ermitteln. Neben einfach festzustellenden Unsicherheiten, die Leuchtdichtemessungen, die Leuchtdichthomogenität und deren Ansteuerbarkeit betreffend, ist die Bestimmung der spektralen Varianz für den gegebenen Versuch nicht trivial. Diesbezüglich findet derzeit eine Menge an Gremienarbeit statt, welche jedoch noch zu keiner abschließenden Empfehlung gelangte. Insofern wird zwar eine Betrachtung der wellenlängenbasierten Ungenauigkeiten durchgeführt, diese geht jedoch nicht in einen Gesamtfehler mit ein. Stattdessen wird im Zuge der Arbeit das Kriterium der $V(\lambda)$ Bewertung herangezogen, um dadurch die spektral hervorgerufenen systematischen Einflüsse kenntlich zu machen. Dies erfolgt in zwei Schritten. Erstens wird auf die gerätespezifischen Wellenlängenabweichungen eingegangen. In der zweiten Phase wird der durch die Wellenlängenkalibrierung minimierte Versatz in der spektralen Darbietung genutzt und ein prozentualer Wert der Abweichung zum Sollwert, also dem spektralen Versatz unter $V(\lambda)$ entsprechend, berechnet. Einen weiteren Vorteil dieses Vorgehens stellt die Angabe einer spektralen Unsicherheit in einer prozentualen Leuchtdichteabweichung dar. Diese wird als weiterer unabhängiger Faktor in einfacher Weise in die leuchtdichtebasierten Unsicherheiten einbezogen und rundet das Gesamtbild ab.

Für die Vermessung lichttechnischer Größen, beispielsweise der Leuchtdichte, werden verschiedene Kennzahlen an Eigenschaften der Messgeräte erhoben. Dies gewährleistet eine Klassifizierung hinsichtlich der Genauigkeit der zu erhebenden Messgröße und eine Vergleichbarkeit zwischen Geräten der Lichtmessung. [vgl. DIN5032/7]

Hinsichtlich der zu erfolgenden Einordnung von Messgeräten sind sogenannte Fehlerkenngrößen (f-Werte) bestimmter Merkmale ausschlaggebend. Anzumerken ist, dass die aufgeführten Fehlerkenngrößen auch als Kenngrößen zu verstehen sind. Strenggenommen gilt die Größe eines f-Wertes nur unter genauesten Bedingungen einer Messgerätkalibrierung. Weicht zum Beispiel das zu vermessende Spektrum von der Kalibriernormlichtart A, den bei der Kalibrierung vorherrschenden Temperaturen, Messfeldgrößen etc. ab, haben die im Kalibrierschein angegebenen f-Werte keinerlei Gültigkeit. Diese sind demzufolge eher als Näherungswerte einer in Frage kommenden Messunsicherheit des Messgeräts zu verstehen. Dem Fakt Rechnung tragend, ist im Folgenden ein Gesamtfehlerwert der verwendeten Messgeräte angegeben, geht jedoch nicht in die Betrachtung von systematischen Einflussfaktoren mit ein.

Leuchtdichte

Zur Vermessung der Leuchtdichtehomogenität wurde die Leuchtdichtemesskamera LMK 98/3 benutzt. Diese hat eine vom Hersteller angegebene Gesamtmessunsicherheit von $f_{\text{ges}} < 10\%$. Bestimmend für eine homogene Verteilung der Leuchtdichte über die Präsentationsfläche ist die Beschaffenheit der reflektierenden Fläche selbst. Nach Vermessung ist eine Varianz in der Leuchtdichtehomogenität über die betrachtete Präsentationsfläche von kleiner 6,5 % zu verzeichnen. Da es sich bei der LMK 98/3 um eine orts aufgelöste Leuchtdichtemesskamera handelt, werden sämtliche Leuchtdichten einer Szenerie, hier der Präsentationsfläche, simultan bestimmt. Der Kennwert der Flächeninhomogenität wird aus dem Minimal- und Maximalwert einer Leuchtdichtemessung bestimmt. Folglich, eine unwahrscheinliche Nichtlinearität über die in der LMK verbauten CCD-Matrix vernachlässigend, sind für alle gemessenen Leuchtdichten identische Bedingungen vorhanden. Durch Berechnung einer relativen Kennzahl können sämtliche Unsicherheiten ignoriert werden und es ergibt sich die oben genannte Varianz.

Zur Einstellung der Leuchtdichteniveaus, deren Kontrolle und der erforderlichen Messung bezüglich der Lampendegradation wurde die Leuchtdichtemesskamera LMT 1009 (Klasse A nach DIN5032/7) verwendet. Auch hier wird ein Gesamtfehler von $f_{\text{ges}} < 7,5\%$ angegeben. Bei jedem Gebrauch der Lichtquelle findet eine Reduktion des Strahlungsflusses der Primärlichtquelle statt. Als kritische Zeit wird hierbei eine Stunde angesehen, jene Zeit, welche vergeht um einen Versuchsdurchgang zu absolvieren. Während dieser Zeit ist eine Nachregelung der Adaptationsleuchtdichte oder der Stimulusleuchtdichten nicht möglich. Der diesbezügliche Fehler ist mit circa 1 % anzugeben.

Die Stimuluspräsentation ist gekennzeichnet durch die Genauigkeit des erzeugten „SpecPacks“, respektive, wie gut die Adaptationsleuchtdichten an die vorgegebenen vier Leuchtdichtewerte heranreichen. Durch den beschriebenen Algorithmus ist dies mit einem Gesamtfehler von maximal 3 % möglich. Es erfolgt eine Generierung von 820 Spektren je Probandenversuch. Auf allen Stimulusleveln sind die angestrebten Adaptationsniveaus zu erreichen und die Stimulusleuchtdichten einzustellen. Eine Abweichung bezüglich der Dimmung vom obersten Intensitätslevel bis zum untersten ist aus Tabelle 12 zu entnehmen. Der maximale Fehler liegt bei unter 4,5 %. Zu beachten ist weiterhin ein Einfluss, der resultierend aus der Xenon-Höchstdrucklampe selbst resultiert. Während der Nutzung kommt es zu Fluktuationen des Strahlungsflusses. Diese macht sich bei einer genauen Vermessung von Leuchtdichten, wie beispielsweise zur

Erstellung der Dimmfunktionen, negativ bemerkbar und kann durch Mittelwertbildung der maximalen Messwertausschläge kompensiert werden. Ein solches Schwanken ist mit maximal 3 % beziffert, variiert jedoch im angegebenen Bereich je Lichtquelle und Umgebungsvariablen.

	Bezeichnung der Einflußgröße	Fehlerkenngröße	
Homogenität	Inhomogene Ausleuchtung der Integrationskugel	<6,5%	
	δ_H	6,5%	11,93%
Stimulus	LMT 1009		<7,5%
	Degradation Lichtquellenprimär	≤1%	≤1%
	Berechnung der Hauptleuchtdichten mit „SpecPack“	≤3%	≤3%
	Varianz über die Dimmung der Stimuli	≤4,5%	≤4,5%
	Fluktuation der Lichtquelle	<3%	<3%
	Quantisierungsfehler beim Abgleich	1,5%	1,5%
	δ_S	6,44%	9,89%
Gesamt	$\delta_{GS} = \sqrt{\delta_H^2 + \delta_S^2}$	9,15%	11,83%

Tabelle 14: Aufstellung der Einflussfaktoren auf die Stimuluspräsentation und deren Einzel- und Gesamtfehlerkenngrößen (grau: Hinzunahme der Näherungswerte der Gesamtfehlerkenngröße des Messgeräts)

Der Proband hat die Aufgabe des Abgleichs auf gleiches Hellempfinden. Hierbei ist mitunter zwischen zwei Stufen der Stimuli zu entscheiden. Durch die Größe einer Quantisierungsstufe von 3 % ist der Fehler bei einer Entscheidung bei Nichtgleichheit mit maximal 1,5 % anzugeben. Zusammenfassend ergibt sich eine Unsicherheit des Versuchs- und Forschungsstandes in punkto Stimuluseinstellung von $\delta_{GS}=9,15\%$, begründet durch die nachvollziehbaren Einflussgrößen und deren Fehlerkenngrößen.

Spektrum

Neben der exakten Leuchtdichtedarbietung der Stimuli ist die korrekte spektrale Zusammensetzung und deren Konstanz bezüglich der Untersuchungsvariablen zu gewährleisten. Diesbezüglich fanden umfangreiche Messungen statt. Aus Abschnitt 6.1 und 6.2 ist zu entnehmen, dass es zu keiner Veränderung der Wellenlänge über die Präsentationsfläche kommt. Eine Konstanz der Wellenlängenzuordnung infolge einer Intensitätsveränderung durch das OL 490 ist gegeben. Etwaige Fehlerquellen in der Spektrenerzeugung sind als gerätespezifische einzustufen. Auf die Ausprägung von Simulationsfehlern, vergleichend zum Original, wurde schon ausführlich eingegangen (Tabelle 12). Weiterhin findet nur ein Bezug auf die Größe der simulationsinternen Abweichungen statt, also jenen, welche zwischen den simulierten Spektren auftreten. Somit ist das schon genannte Kriterium der Vergleichbarkeit innerhalb der Untersuchung gegeben.

Die zu bestimmenden spektralen Einflussfaktoren ergeben sich zusammengesetzt aus der Genauigkeit des Spektroradiometers und der Modulatoreinheit des OL 490. Bei beiden ist in den Datenblättern eine Wellenlängengenauigkeit von $\pm 0,5$ nm ausgewiesen. Die spektrale Auflösung ist mit 0,4 nm verzeichnet. Eine Überprüfung der spektralen Kalibrierung des OL 770 fand zusätzlich mit einem Quecksilber-Argon-Normal (HgAr) statt.

Ist eine spektrale Abweichung zu betrachten, kann diese nicht für jede spektrale Verteilung gelten, sondern ist für jedes Spektrum spezifisch zu bestimmen. Zur Berechnung der spektralen Abweichung wird die $V(\lambda)$ -Funktion als Kriterium verwendet. Im Falle keiner Abweichung bei der Spektrenvermessung und -erstellung gibt die gemessene spektrale Strahldichte, berechnet mit der photopischen Hellempfindungsfunktion den Sollwert wieder. Abweichungen kennzeichnen sich durch eine Wellenlängenverschiebung des gesamten Spektrums. Bildlich gesprochen verschiebt sich ein Spektrum nach links, in den kurzwelligen Bereich, wenn die spektrale Abweichung mit negativem Vorzeichen belegt ist und in die langwellige Richtung, wenn ein positiver spektraler Versatz zu erwarten ist. Beide beschreiben den mit der jeweiligen Varianz belasteten Istwert.

Für die genaue Simulation der Spektren ist im ersten Schritt eine Wellenlängenkalibrierung des OL 490 durchzuführen (Kapitel 6). Nach den vorliegenden Daten ist die maximale Abweichung im langwelligen Bereich zu finden. Diese beläuft sich auf $\Delta\lambda = -1,7$ nm bei $\lambda = 780$ nm. Ausgehend von der Realisierbarkeit einer spektralen Erzeugung der Stimuli durch die Restriktionen des Primärs wäre die Annahme eines solchen Fehlers zu hoch. Im restlichen Spektralbereich beläuft sich der berechnete maximale Fehler auf $\Delta\lambda = 1,08$ nm. In Bezug auf die Genauigkeit der Hardware beläuft sich der spektrale Gesamtversatz auf $\Delta\lambda_{\text{ges}} = \pm 2,08$ nm. Bei der Vermessung der simulierten Spektren ist jedoch die Auflösung des Messgeräts, des OL 770 mit 0,4 nm, maßgebend. Dem folgend wird die spektrale Unsicherheit mit dem nächst höheren Inkrement versehen. Der für die Berechnung ausschlaggebende Gesamtversatz erhöht sich auf $\Delta\lambda_{\text{ges}} = \pm 2,4$ nm.

Bezeichnung des Merkmals	Größe des spektralen Fehlerkennwerts
Genauigkeit OL 770	$\pm 0,5$ nm
Genauigkeit OL 490	$\pm 0,5$ nm
Max. Abweichung nach Wellenlängenkalibrierung OL 490, relevanter Wellenlängenbereich	$\pm 1,08$ nm
Gesamtunsicherheit hinsichtlich Auflösung δ_λ	$\pm 2,4$ nm

Tabelle 15: Spektrale Abweichungen δ_λ des Forschungsstandes

Durch die Kenntnis des maximal auftretenden spektralen Versatzes ist es möglich, dessen prozentuale Abweichung zu berechnen. Hierzu wurden simulierte Spektren des Leuchtdichtenniveaus von $L = 1$ cd/m² herangezogen. Die Abweichung des Sollwerts berechnet sich nach $\Delta_{\text{Sollwert}} = \text{Sollwert} - \text{Istwert}$. Sich daraus ergebende Abweichungen sind Tabelle 16 zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass die Abweichungen, bedingt durch Unzulänglichkeiten der Wellenlängenkalibrierung, einen sehr geringen Einfluss auf die Darstellung der Stimuli und den systematischen Gesamtfehlerkennwert haben.

Spektrum	Sollwert [cd/m ²]	Δ zum Sollwert [cd/m ²]		$\Sigma\delta_{\Delta\lambda\pm 2,4\text{nm}}$ [%]	$\delta_{GS,\Delta\lambda} = \sqrt{\delta_{GS}^2 + \delta_{\Delta\lambda}^2}$ [%]	
		$\Delta\lambda_{\text{ges}}$ bei -2,4nm	$ \Delta\lambda_{\text{ges}}$ bei +2,4nm			
Halogen*	1,017	0,013	0,013	2,56	9,50	12,10
Xenon*	0,994	0,002	0,002	0,40	9,16	11,84
LED*	0,991	0,001	0,002	0,30	9,15	11,83
D65*	0,994	0,005	0,005	1,01	9,21	11,87
P9K2*	0,972	0,020	0,020	4,12	10,03	12,53

Tabelle 16: Maximale spektrale Abweichungen und deren Auswirkung auf die Gesamtfehlerkenngröße (grau: in Verbindung mit Gesamtfehlerkenngröße des Messgeräts)

KAPITEL 8

UNTERSUCHUNG ZUR HELLEMPFINDUNG UND METHODENPRÄFERENZ

Vor der eigentlichen Untersuchung musste über den geeigneten Methodeneinsatz entschieden werden (vgl. Kapitel 3.5 & 4). Dazu wurden Pretests durchgeführt und es konnten mittels der Vorversuche Abläufe überprüft und optimiert werden. Ziel des vorliegenden Abschnitts ist es, aus unterschiedlichen Möglichkeiten eine geeignete Methode empirisch zu bestimmen. Als Kriterien dienen die Standardabweichung und die Werteübereinstimmung eines Null-Condition-Tests (NCT). Hinsichtlich der getroffenen Ausschlusskriterien sind die Methoden des gedächtnisbasierten Abgleichs, Memory Brightness Matching (MBM), und einer Methode des sukzessiven Abgleichs, Successive Binocular Brightness Matching (SBBM), gegenübergestellt. Explorativ wurde zu diesem Zeitpunkt mit einer sehr kleinen Stichprobe gearbeitet und die gewonnenen Daten wurden hinsichtlich etwaiger Tendenzen ausgewertet.

Die im vorliegenden Kapitel erarbeiteten Grundlagen (Versuchsdurchführung, Stimuluspräsentation, Versuchsvariablen, Untersuchungsgütemerkmale) stellen sich sehr umfangreich dar, bilden jedoch die Grundlage für den Hauptversuch. Zur besseren Verständlichkeit wird ein kompletter Versuchsdurchlauf in Kapitel 8.3 beschrieben.

Überdies diente die Durchführung des vorliegenden Pretests als erstmalige Erprobung des Forschungsaufbaus, der Spektrenerzeugung und Stimuluspräsentation an naiven Probanden. Somit war die Möglichkeit einer Feinabstimmung des Untersuchungsdesigns gegeben und festgestellte Verbesserungen in der Stimulierzeugung und -präsentation fanden Umsetzung.

8.1 Forschungsansatz und -hypothesen

In Kapitel 3.5 sind einzelne Forschungsmethoden zur Quantifizierung einer Hellempfindung vorgestellt. Nach einer kritischen Diskussion über deren Anwendbarkeit unter den vorliegenden speziellen Bedingungen findet eine Eingrenzung der Herangehensweisen in Kapitel 4.2 statt. Da in der Literatur weder das MBM noch das SBMM eine eindeutig favorisierte Methode darstellt, war es Aufgabe dieser Untersuchung, beide Methoden zu bewerten. Dafür wurde ein Pretest an zwei gleich großen Probandengruppen durchgeführt. Neben der Wahl einer Methode für den folgenden Maintest rückte die Überprüfung weiterer untersuchungsrelevanter Kriterien sowie der Test des Versuchsdesigns an sich in den Fokus.

Dynamik und Stufung der Stimuli

Hierbei galt es, folgende Annahmen zu untersuchen und gegebenenfalls einer Modifizierung zu unterziehen. Ziel des Probanden sollte es sein, einen Abgleich auf gleiche Hellempfindung zweier Stimuli durchzuführen. Es gilt somit in erster Linie zu klären, inwieweit die Präsentationsstufen eines Stimulus getrennt sein dürfen, um eine feine Einstellung des Kriteriums „gleich hell“ auf die Referenz zu ermöglichen. In Vorversuchen zeigte sich ein Stufenabstand von 3 % als hinreichend genau. Bezüglich dieses Sachverhalts galt es weiterhin, insbesondere für den Hauptversuch, festzulegen wie weit der Proband einen maximalen Unterschied des Testreizes unterschiedlichster Spektren zur Referenz Halogen* einstellt. Dies wurde anhand aller Adaptationsniveaus geprüft. Ausgangspunkt war ein Dynamikbereich von ± 60 %, ausgehend von der jeweiligen Adaptationsleuchtdichte. Folglich standen dem Probanden je 20 Stufen im überschwelligem und unterschwelligen Bereich zur Verfügung. Die 21. Stufe bildete den Messtechnischen Ankerpunkt, bei welchem der Referenz- und Teststimulus der Leuchtdichte des Adaptationsniveaus entsprachen.

Readaptationszeit

Ein weiterer, wichtiger Punkt, die genannten Methoden betreffend, bildet die Bestimmung einer Readaptationszeit. Für die spätere Auswertung sollen stabile Abgleichwerte erzielt werden, welche immer auf den Referenzreiz (Halogen*) bezogen sind. Wie in Kapitel 4.2 dargelegt, kann es während des Abgleichs zu Anpassungseffekten des visuellen Systems kommen, welche sich auf spätere Abgleiche auswirken. Das würde zu einer Verzerrung der Abgleichswerte im Ergebnis führen, was in jedem Fall zu vermeiden ist. Folglich ist für das vorliegende Versuchsdesign eine Readaptationszeit zwischen jedem Abgleich zweier Reize implementiert. Nach jeder vollzogenen Einstellung gleicher Hellempfindung ist dem Probanden die Referenz erneut zu präsentieren, um einen Ankerpunkt für den nächsten Abgleich zu bieten. Genaue Aussagen zur Wahl der Readaptationszeitlänge bei gleichen Forschungsansätzen sind nicht zu finden. Vergleichend kann sich auf eine Untersuchung der Readaptationszeit und deren Folgerungen auf den nächtlichen Straßenverkehr bezogen werden. Innerhalb dieser Untersuchung ist die „Zeit bis zum Erreichen der vorherigen Sehfähigkeit“ bei Verschwinden des ursprünglichen Lichtreizes als Readaptationszeit verstanden. Untersucht wurde, in Abhängigkeit von Umfeldleuchtdichten, Störzeiten und Störleuchtdichten, die Erkennbarkeitsschwelle eines Landoltrings mit 4' Öffnungswinkel. Bei der ungünstigsten untersuchten Bedingung eines Adaptationsumfeldes von $L=0,1$ cd/m², einer Störzeit von 3 Sekunden und einer Störleuchtdichte von 300 cd/m² ergibt sich eine Readaptationszeit von $T_{ra}=9,2$ Sekunden bei einer Erkennbarkeitshäufigkeit von 90 %. Hinsichtlich einer Erkennbarkeitswahrscheinlichkeit von 50 % liegt ein $T_{ra}=5,4$ Sekunden vor. [vgl. RODDEWIG 1983]

Aus Vorversuchen wurde ersichtlich, dass ein Abgleich der Hellempfindung zwischen 5 und 10 Sekunden dauert. Vergleichend mit der besagten Studie ist weiterhin anzumerken, dass der Abgleich des Hellempfindens, also der Wahrnehmungsprozess, vor dem Prozess der Erkennbarkeit stattfindet. Zuzüglich findet beim vorliegenden Versuchsdesign ein Abgleich von Leuchtdichten statt, welche sich innerhalb circa einer Dekade, ausgehend von der Referenz, befinden. Durch die aufgeführten, geringeren Anforderungen kann eine Readaptationszeit $T_{ra} < 9,2$ Sekunden gewählt werden. Daraus resultiert die Festlegung, dass die Readaptationszeit identisch mit der benötigten Abgleichzeit sei. Somit werden Stimuluseinflüsse aus vorhergehenden Darbietungen nivelliert.

Variablenübersicht

Neben der Analyse genannter Parameter sollte eine Entscheidung über die im Hauptversuch Verwendung findende Methode getroffen werden. Ein Auswahlkriterium bilden die mittels NCT erhobenen Ergebnisse. Dieser Test ist Bestandteil des aktuellen Versuchsdesigns und ist gekennzeichnet durch einen Hellempfindungsabgleich eines Halogenstimulus auf die Referenz (Halogen*) bei allen Versuchsbedingungen. Zusätzlich sind weiterhin die interindividuellen Standardabweichungen je Methode betrachtet. Wie schon aus vorangegangenen Studien bekannt, ist eine erhöhte Varianz bei der Einschätzung des Hellempfindens zu erwarten. Außerdem ist u. a. infolge der Arbeiten von FOTIOS ET AL. (Kap. 4.2.1) sowie der in Kapitel 4.1.3 genannten Arbeiten eine Abhängigkeit des Abgleichkriteriums von der Annäherungsrichtung anzunehmen, ergo von einer überschwelligen oder unterschwelligen Startposition des Testreizes zur Referenz. Zum Ausgleich dieser Problematiken wurden je Proband vier Abgleichwiederholungen durchgeführt - alternierend in je zwei überschwellige und unterschwellige Einstellungen. Für die durchgeführte Untersuchung ergibt sich das in Abbildung 45 dargestellte Konstrukt an Variablen. Jede Methode (2) ist anhand unterschiedlicher stimulierter Netzhautgrößen (3), vier Leuchtdichteadaptationsniveaus und fünf simulierten Spektren untersucht worden.

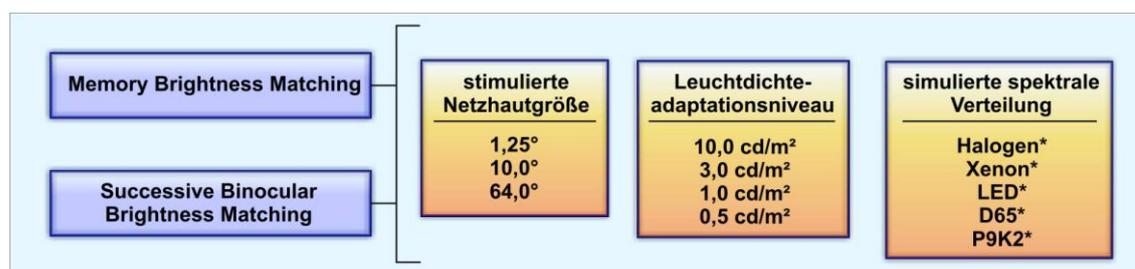


Abbildung 45: Versuchsvariablen des Pretests (blau: Methode; orange: unabhängige Variable)

Es ergeben sich für den Vorversuch folgende Hypothesen:

- Ein Methodenvergleich hinsichtlich der Einstellung einer Hellempfindung lässt sich durch einen NCT durchführen. Stellen sich bei diesem einfachen Abgleichkriterium große Unterschiede ein, ist die Methode zu revidieren oder abzulehnen.
- Durch Nutzung der SBBM-Methode werden „Vergessenseffekte“ minimiert und die Veranschaulichung des Versuchsziels bei den Probanden verbessert. Diesbezüglich ist eine genauere Einstellung der gleichen Hellempfindung als bei der MBM-Methode zu erwarten.
- Offsets durch Verzerrungseffekte können durch den NCT erkannt werden und ergeben somit eine Möglichkeit zur Gegensteuerung.

Für die Untersuchung sind eine genaue Variablenkontrolle und eine ausreichende Randomisierung der die unabhängigen Variablen bestimmenden Items zu beachten.

8.2 Probandenkollektiv

Die Stichprobe rekrutierte sich aus je fünf naiven Probanden pro Methode. Eine Gratifikation fand nicht statt. Für eine Vergleichbarkeit der Methoden wurde ein Messwiederholungsdesign gewählt. Dies bedeutet, dass die Probanden der Methode 1 gleichzeitig auch die Probanden der Methode 2 sind. Das Ergebnis verzerrende, biologische Faktoren unterschiedlicher Versuchsteilnehmer können somit ausgeschlossen werden. Im vorliegenden Vorversuch konnte dieser Ansatz bis auf einen Probanden erfüllt werden. Auffälligkeiten sind aufgrund der dem Versuch vorhergehenden Prüfung visueller Charakteristika nicht festgestellt worden.

Ein Ausschlusskriterium bildete ein Visus von unter 0,7. Weiterhin wurden keine Probanden mit Farbsinnstörungen zugelassen. Die Einnahme von den Pupillenreflex verändernden oder die Lichtempfindlichkeit beeinflussenden Medikamenten führte zum Ausschluss. Ergänzung fand dies in der Befragung der Probanden nach Auffälligkeiten hinsichtlich der Lichtempfindlichkeit, Blendempfindlichkeit und Ermüdungsverhalten im Dunkeln. Zur Vermeidung einer Einschränkung der stimulierten Netzhautgröße wurden keine Brillenträger zugelassen. Für Prüfung der Sehschärfe fand das Sehtestgerät VISTEC R22, mit der Testscheibe 119, Anwendung. Es wurden beide Sehkanäle angesprochen und die Hyperopieeinstellung befand sich bei 0 dpt (Dioptrien). Die Prüfung des Visus erfolgte über eine Ferneinstellung mit einem Abstand von 55 cm. Hinsichtlich der Prüfung auf Farbsinnstörungen (Prävalenz von Deuter- und Protanomalie) wurde auf die ISHIHARA-Farbtafeln (2002) zurückgegriffen. Für den Pretest stellen sich die Stichproben wie folgt dar.

Methode	Proband	Alter in Jahren	Geschlecht	Visus
MBM	1	28	m	1,0
	2	25	m	1,0
	3	27	m	1,0
	4	21	w	0,8
	5a	31	m	1,0
SBBM	1	28	m	1,0
	2	25	m	1,0
	3	27	m	1,0
	4	21	w	0,8
	5b	28	m	1,0

Tabelle 17: Übersicht der Probandenstichprobe für den Pretest

8.3 Versuchsdurchführung

Der Ablauf des Versuch gliedert sich in zwei Phasen, in eine der Probandenvorbereitung und in die eigentliche Versuchsdurchführung. Diese sind schematisch in Abbildung 46 aufgezeigt. Die Zeitangaben kennzeichnen die durchschnittliche Dauer des jeweiligen Aktionspunktes. Grundsätzlich gilt der aufgeführte Ablauf für beide Methoden. Auf Unterschiede, welche die jeweilige Methode betreffen, wird in der folgenden Ablaufbeschreibung explizit eingegangen.

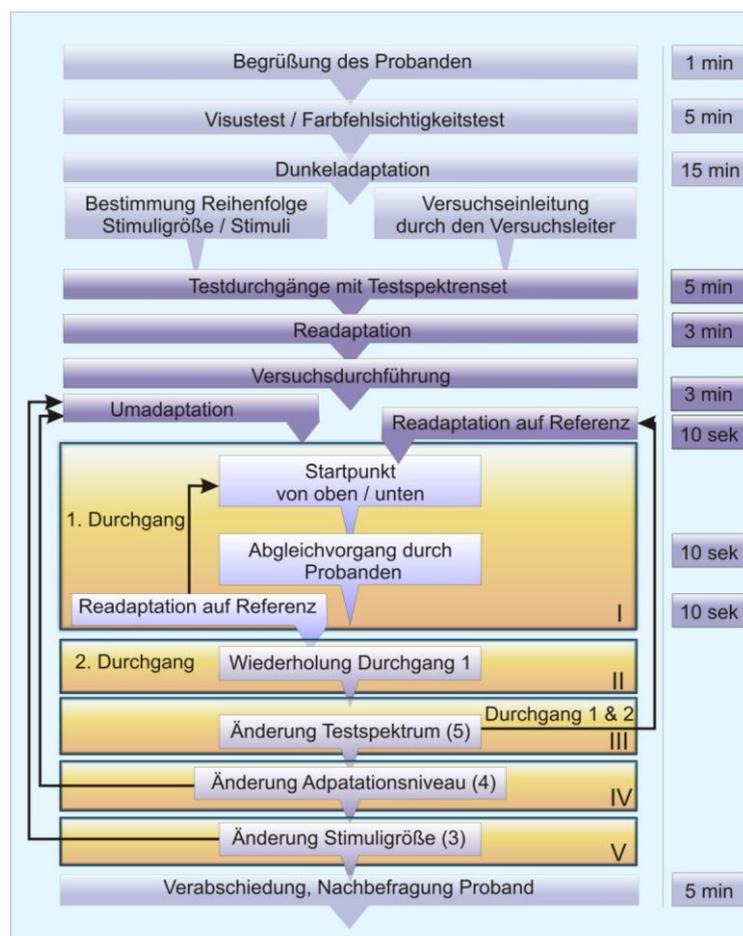


Abbildung 46: Versuchsablauf in schematischer Darstellung (hellblau: Versuchsvorbereitung/-nachbereitung (Phase 1); dunkelblau: eigentlicher Versuch (Phase 2); orange: Abgleichvorgänge)

Im ersten Schritt des Pretests erfolgte die Begrüßung des Probanden und die Aufnahme demographischer Daten. Anschließend wurde mit dem Sehtestgerät VISTEC R22 der Visus geprüft sowie mittels ISHAHARA-Farbtafeln eine Einschätzung eventueller Farbsinnstörungen durchgeführt. Trat keines der Ausschlusskriterien ein, wurde der Proband zum Versuch zugelassen und in das Dunkellabor begleitet, in welchem die Dunkeladaptation stattfand. Aufgrund der vorhandenen Adaptationsniveaus wurde die Zeit für die Adaptation auf 15 Minuten festgesetzt. Diese unterteilt sich in 10 Minuten reine Dunkeladaptation und 5 Minuten Adaptation auf die unterste Stimulusleuchtdichte der Referenz bei $L=0,5 \text{ cd/m}^2$. Während dieser Zeit hatte der Proband die Möglichkeit, die Kinnstütze zur Arretierung des Kopfes auf die entsprechende Höhe einzustellen, um eine orthogonale Blickzuwendung zum Mittelpunkt der Präsentationsfläche zu realisieren.

Während der Adaptationszeit fand eine zufallsbasierte Zuteilung des Probanden zur Methode des MBM oder SBBM statt. Da jeder Proband einen Abgleich der Hellempfindung anhand beider Ansätze durchführen sollte, fand nach Beendigung eines vollen Versuchsablaufs der Methodenwechsel statt. Die Auswirkung von Lerneffekten konnte somit kontrolliert werden. Außerdem verfügte

der Versuchsleiter für den Versuch über fünf zufallsbasierte Spektrenreihenfolgen sowie über zwei randomisierte Reihenfolgen die stimulierten Netzhautgrößen betreffend. Aus Tabelle 18 sind die Reihenfolgemöglichkeiten zu entnehmen. Die anschließende Wahl des Probanden bestimmte fortan die zufallsbasierte Variablendarbietung. Parallel erfolgte die Erstellung eines Spektrensets für den aktuellen Lampendegradationspunkt und dem folgend die Importierung der durch den Probanden bestimmten Variablenabfolge (vgl. Kapitel 5). Der Testleiter las außerdem die Instruktion vor, welche für das SBBM im Anhang hinterlegt ist. Die Beschreibung des Versuchs und des Abgleichkriteriums war für beide Methoden identisch. Einzig die Vorgehensweise der Einstellung eines Hellempfindens beim MBM (Vorgang der Einprägung etc.) unterlag einer Modifikation.

Variable	ID-Nummer	Leuchtdichte-adaptationsniveau	Reihenfolge der Items
Stimulierte Netzhautgröße	1		64,0° 10,0° 1,25°
	2		1,25° 10,0° 64°
Simuliertes Spektrum	1	0,5 cd/m ²	D65* LED* Xenon* P9K2* Halogen*
		1,0 cd/m ²	Halogen* LED* D65* Xenon* P9K2*
		3,0 cd/m ²	Halogen* LED* D65* Xenon* P9K2*
		10,0 cd/m ²	LED* Halogen* P9K2* Xenon* D65*
	2	0,5 cd/m ²	Halogen* LED* D65* Xenon* P9K2*
		1,0 cd/m ²	LED* Halogen* P9K2* Xenon* D65*
		3,0 cd/m ²	D65* LED* Xenon* P9K2* Halogen*
		10,0 cd/m ²	Halogen* LED* D65* Xenon* P9K2*
	3	0,5 cd/m ²	LED* Halogen* P9K2* Xenon* D65*
		1,0 cd/m ²	Halogen* LED* D65* Xenon* P9K2*
		3,0 cd/m ²	LED* Halogen* P9K2* Xenon* D65*
		10,0 cd/m ²	LED* Halogen* P9K2* Xenon* D65*
	4	0,5 cd/m ²	Halogen* LED* D65* Xenon* P9K2*
		1,0 cd/m ²	Halogen* LED* D65* Xenon* P9K2*
		3,0 cd/m ²	LED* Halogen* P9K2* Xenon* D65*
		10,0 cd/m ²	D65* LED* Xenon* P9K2* Halogen*
	5	0,5 cd/m ²	LED* Halogen* P9K2* Xenon* D65*
		1,0 cd/m ²	LED* Halogen* P9K2* Xenon* D65*
		3,0 cd/m ²	Halogen* LED* D65* Xenon* P9K2*
		10,0 cd/m ²	LED* Halogen* P9K2* Xenon* D65*

Tabelle 18: Zuordnung der Itemreihenfolge der Variablen Spektrum und stimulierte Netzhautgröße

Anschließend wurde der Proband, mit Beginn der Phase 2, mittels vier Testabgleichen in die Abgleichtechnik und die Handhabung der Tastatur eingewiesen. Begonnen wurde immer mit der einfachsten Abgleichkondition, welche später auch dem NCT entsprach. Alle weiteren Teststimuli zum Abgleich auf die Referenz während der Versuchseinführung oblagen der Entscheidung des Versuchsleiters. Nach Abschluss der vier Testdurchgänge erfolgte eine erneute Adaptation auf die Referenz, um einen Nullpunkt für die zu wertenden Abgleiche zu setzen. Somit konnte mit der eigentlichen Versuchsdurchführung begonnen werden.

Der Versuchsleiter gab nach Verstreichen der Readaptationszeit einen aus der Tabelle 18 resultierenden Reiz für den Abgleich auf gleiches Hellempfinden an den Probanden frei. Dieser konnte nun selbstständig den Abgleich mittels der auf der Tastatur vorhandenen Pfeiltasten durchführen. Bei der SBBM-Methode bestand zudem die Möglichkeit, mittels einer weiteren Taste (R) auf die Referenz zuzugreifen, welche bei der gedächtnisbasierten Methode nicht vorhanden war. Bei Freigabe der Probandensteuerung wählte der Testleiter zufallsbasiert den Einstieg des Abgleichstimulus. Stufe 21 bildete immer den Umkehrpunkt zwischen unterschwelliger und überschwelliger Reizdarbietung. Dieser Vorgang bestimmte, mit welcher Stufe oberhalb bzw. unterhalb des Umkehrpunkts, je nach vorgegebener Abgleichrichtung, der Proband einen Abgleich des Hellempfindens begann. Wie in Abbildung 46 visualisiert, startete der erste Durchgang jeweils mit der Abgleichsrichtung „von oben“, also überschwellig für das erste Referenz-Test-Paar. Nach erfolgter Wortmeldung des Probanden über ein subjektiv gleiches Hellempfinden präsentierte der Testleiter wieder die Referenz, entzog damit dem Probanden die Steuerung und notierte die eingestellte Stufe. Bei der Methode des Memory Brightness Matching erfolgte nach erfolgreichem Abgleich die Nutzung des OL 490 Shutters, damit der Proband nach Umschalten auf die folgende Referenz keinem Gefühl der Richtig- oder Falscheinstellung unterlag. Nach Verstreichen der Readaptationszeit wiederholte sich der Abgleich, jedoch mittels unterschwelliger Startposition (Durchgang II). Erst nachdem alle Abgleichvariationen innerhalb einer stimulierten Netzhautgröße und eines Leuchtdichteadaptationsniveaus im ersten und zweiten Durchgang mit je zwei Abgleichen jedes Testspektrums beendet waren, starteten die Durchgänge selbiger Zusammensetzung erneut. Einziger Unterschied bestand in einer Invertierung der Startpositionen. Diesmal begann der Proband zuerst mit einem unterschwelligen Reiz, welchem ein überschwelliger folgte.

Mit Absolvierung dieses Vorgangs änderte sich nunmehr das Adaptationsniveau. Nach erfolgter Umadaptation³² begann die beschriebene Abgleichprozedur von Neuem, mit Ausnahme der Itemreihenfolge simulierter Spektren. Jene unterlag der zufallsbasierten Wahl einer Spektenreihenfolge aus Phase 1 des Versuchs. Insgesamt tätigte der Proband für eine dargebotene Sehzeichengröße 240 Abgleiche auf gleiches Hellempfinden. Anhand der Zeitangaben lässt sich daraus eine maximale Versuchszeit für Phase 2, der eigentlichen Versuchsdurchführung bei einer stimulierten Netzhautgröße, von ca. 100 Minuten ableiten. Aus der Literatur und eigenen Erfahrungen stellt dies den kritischen Zeitumfang eines Versuchskonzepts dar. Länger andauernde Versuche gehen mit einer Abnahme an Konzentrationsfähigkeit und dem Verlust an Qualität der Einstellvorgänge einher. Daraus resultierend entstand eine Teilung des Gesamtversuchs in je drei Einzelversuche, entsprechend der stimulierten Netzhautgröße. Nach erfolgreich beendetem Einzelversuch erfolgte die Verabschiedung des Probanden und die Befragung bezüglich etwaiger Anmerkungen zum Versuch sowie Aussagen zur Schwierigkeit der geforderten Einstellungen.

Im Ergebnis stehen für eine Bewertung der Forschungsfrage zwei mal fünf Datensätze zu je 240 Abgleichwerten zur Verfügung.

³² Zeitangabe entnommen aus Abbildung 12. [vgl. KOKOSCHKA 2003]

8.4 Methodenvergleichsbezogene Ergebnisse

Die Einschätzung von Hellempfindungen ist eine schwierige Aufgabe. Eine entsprechend hohe Varianz ist zu erwarten. Für eine spätere Bewertung der Daten empfiehlt es sich, eine oder mehrere Messwiederholungen durchzuführen, um einen stabilen Mittelwert zu erhalten. Bedingt durch einen vermuteten Effekt der Einstellrichtung auf den Abgleich der Hellempfindung sind die Wiederholungen auf die Abgleichrichtungen abzustimmen [vgl. FOTIOS ET AL. 2007]³³.

Der für die Datenauswertung verwendete Mittelwert ergibt sich aus den vier gewonnenen Abgleichs Einzelwerten. Die Anzahl der vorliegenden 240 Abgleiche reduziert sich somit auf 80 in die Auswertung einfließende Mittelwerte. Entsprechend der Gleichung 10 für die äquivalente Leuchtdichte, also dem Verhältnis (V_{eq}) des jeweils abgeglichenen Testreizes (L_{Test}) zur Referenz (L_{Ref}), ergibt sich Gleichung 19. Diese probandenbezogenen Daten sind die Basis weiterführender Auswertungen. Resultierend lässt sich ein individueller Mittelwert von allen fünf Probanden je Methode und Abgleichkondition berechnen.

$$V_{eq\%,i} = \left(\frac{\frac{1}{4} \cdot \sum_1^4 L_{Test}}{L_{Ref}} - 1 \right) \cdot 100 \% \quad (Gl.19)$$

Kernanliegen des Pretests war es, das Versuchsdesign zu erproben und einen Methodenausschluss für den Hauptversuch durchzuführen. Neben den erweiternd durchgeführten inferenzstatistischen Auswertungen der im Hauptversuch vertretenen Hypothesen konnte als Trend festgestellt werden, dass eine Reduktion der untersuchten unabhängigen Variablen nicht möglich ist. Anhand der kritischen Probandenmenge wird an dieser Stelle nur die deskriptive Statistik des Null Condition Tests dargestellt. Zu starke Abweichungen von der Nulllinie lassen auf starke Effekte schließen, welche die Einstellung des „richtigen“ Wertes der Hellempfindung negativ beeinflussen. In den Abbildungen 47 und 48 sind die Abgleichverhältnisse des NCT für jede Methode und Versuchskondition abgebildet.

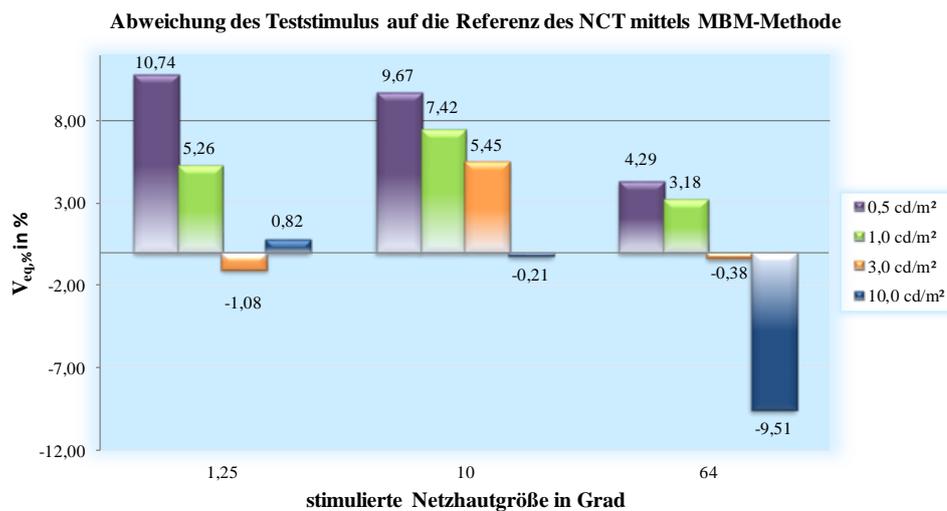


Abbildung 47: Ergebnisse des NCT für die Methode der MBM (Pretest)

³³ Es wurden umfangreiche Untersuchungen zum „contraction bias“ getätigt. Auch wenn die geäußerte Vermutung berechtigt erscheint, weist die zitierte Untersuchung methodische Unzulänglichkeiten auf.

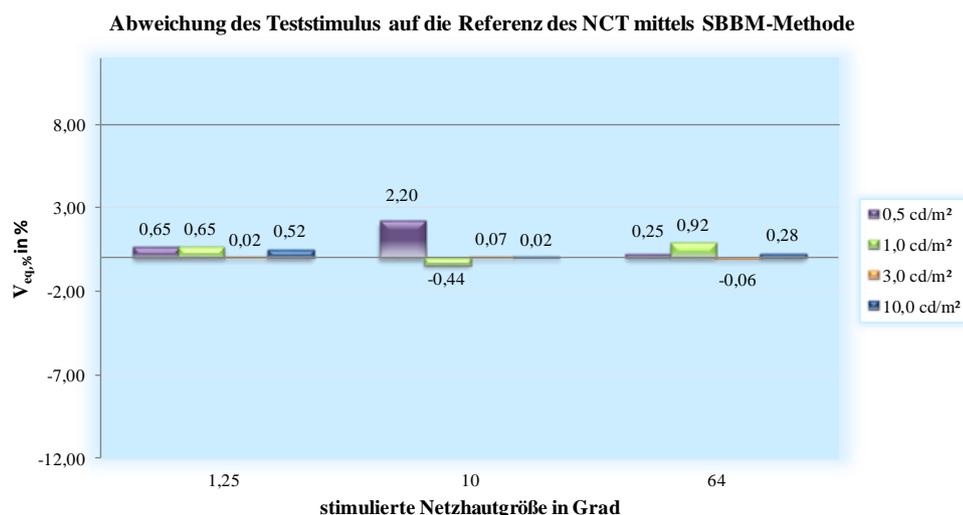


Abbildung 48: Ergebnisse des NCT für die Methode der SBBM (Pretest)

Es ist ersichtlich, dass die Verhältnisse der äquivalenten Leuchtdichte bei der gedächtnisbasierten Methode um ein Vielfaches höher ausfallen als beim sukzessiv geprägten Versuchsablauf. Dies bestätigt die Vermutung, dass es den Probanden schwer fällt, einen Reiz zu verankern und später in Form eines Abgleichs wiederherzustellen. Gründe hierfür sind in der Form einer „absoluten Einschätzung“ zu suchen. Nach dem Vorgang der Einprägung erfolgt zwar ein Abgleich des Testspektrums auf die Referenz, jedoch mit einer erheblichen zeitlichen Verzögerung, was die Vergessenseffekte begünstigt, sowie mit der Maßgabe, den verankerten Reiz auch so wiedergeben zu können, dass daraus eine akkurate Einstellung auf die Referenz erfolgt. Aus den gegebenen Probandenaussagen nach Versuchsende wird ersichtlich, dass eine Beschreibung, eine genaue Erinnerung an den Referenzreiz, nur schwer möglich ist. Oft wurde der eingeprägte Reiz eher mit einem unbewusstem Verankern verglichen, welches eine gewisse Unschärfe aufweist.

Während die Abweichung der eingestellten Testleuchtdichte mit Verwendung der MBM-Methode bei keiner stimulierten Netzhautgröße akzeptabel ist, beträgt die maximale Abweichung bei der SBBM nur 2,2 %. Bezüglich dieses Deltas ist jedoch kein systematischer Verlauf zu erkennen. Die verbleibenden Werte liegen alle unter 1 %. Darauf beruht die Annahme, dass es sich hierbei um eine Zufallsschwankung handelt. Auf eine aufwendige software- oder hardwarebasierte Gegensteuerung wird verzichtet.

Stimulierte Netzhautgröße in °	Methode	$L_{ad}=0,5 \text{ cd/m}^2$		$L_{ad}=1,0 \text{ cd/m}^2$		$L_{ad}=3,0 \text{ cd/m}^2$		$L_{ad}=10,0 \text{ cd/m}^2$	
		MW in cd/m^2	σ	MW in cd/m^2	σ	MW in cd/m^2	σ	MW in cd/m^2	σ
1,25	MBM	10,74	10,29	5,26	2,52	-1,08	3,07	0,82	8,83
	SBBM	0,65	2,05	0,65	1,41	0,02	0,36	0,52	0,68
10,0	MBM	9,67	4,07	7,42	8,49	5,45	2,85	-0,21	8,07
	SBBM	2,20	0,51	-0,44	0,37	0,07	0,08	0,02	0,02
64,0	MBM	4,29	7,10	3,18	8,42	-0,38	4,41	-9,51	9,18
	SBBM	0,25	0,94	0,92	0,00	-0,06	0,71	0,28	0,33

Tabelle 19: Mittelwerte und Standardabweichungen des NCT-Pretests (L_{ad} : Leuchtdichteadaptationsniveau; MW: Mittelwert; σ : Standardabweichung (SD))

In Hinblick auf die Streuung eingestellter NCT-Werte, symbolisiert durch die Standardabweichung, stellt sich ein ähnliches Bild dar. Aus Tabelle 19 ist ersichtlich, dass die Standardabweichungen (SD) für die Methode des Memory Brightness Matching im Minimum um ein Vielfaches größer sind, als für die alternativ betrachtete Vorgehensweise. Für das Erreichen eines genauen Mittelwerts sollte die SD so gering wie möglich sein. Auch hinsichtlich dieser Tatsache ist die sukzessiv basierte Methode des Helligkeitsabgleichs vorzuziehen.

In der Literatur liegen derzeit kaum Ergebnisse hinsichtlich des Vergleichs der MBM- mit der SBBM-Methode vor. Für viele wissenschaftliche Fragestellungen wurde die DBM-Methode genutzt und entsprechend der in Kapitel 4 aufgeführten und diskutierten Studien schon einem Vergleich unterzogen. Mit dem Heranziehen der Untersuchung von BODROGI ET AL. (1999), welche einen Methodenvergleich zwischen DBM und MBM unternahm, lassen sich interessante Aussagen zur Genauigkeit der jeweiligen Methode treffen. Zwar werden bei o. g. Studie andere unabhängige Variablen und Itemausprägungen genutzt, jedoch wird sich auf den Abgleich einer Hellempfindung bezogen. In der vorliegenden Arbeit und in jener von BODROGI und Kollegen liegen zwei geschlossene Systeme vor, welche beide die Methode des MBM beinhalten. Jene durch die MBM-Methode erhaltenen Ergebnisse können somit als Transfersatz (Bezugsgröße) für den Methodenvergleich aus beiden Untersuchungen genutzt werden. Als Operationalisierung für die Genauigkeit ist die Größe der Standardabweichung gewählt. Weiterhin finden für die folgende Bewertung nur die Abgleichwerte bei $L=10 \text{ cd/m}^2$ Verwendung. Jenen Fakt betrachtend sind weder verzerrende mesopische Effekte zu erwarten, noch herrscht ein Unterschied im Adaptationsniveau. Zusätzlich bezieht sich die Bewertung nur auf Werte einer stimulierten Netzhautgröße bei $1,25^\circ$, welche mit dem präsentierten Sehzeichen von 1° mal 2° aus BODROGI's Untersuchung am besten korrespondiert. Für eine Bewertung findet eine Bezugnahme von Mittelwerten des Abgleichs und der Standardabweichung aufeinander statt. Hieraus entsteht je Methode ein Verhältnis der gemittelten Standardabweichung zum gemittelten Wert der Einstellungen. Der MBM-Wert bildet den Basiswert der Normierung beider betrachteter Studien. Daraus resultierend ergeben sich die Werte in Abbildung 49.

Bezüglich der DBM-Methode ist kein nennenswerter Unterschied im Vergleich zum Memory Brightness Matching festzustellen. Der Mittelwert der Standardabweichungen, also die Streuung der Werte und somit ein Maß für die Güte der Einstellungen, nimmt bei der SBBM-Vorgehensweise, bezogen auf die MBM- und DBM-Methode, um circa die Hälfte ab.

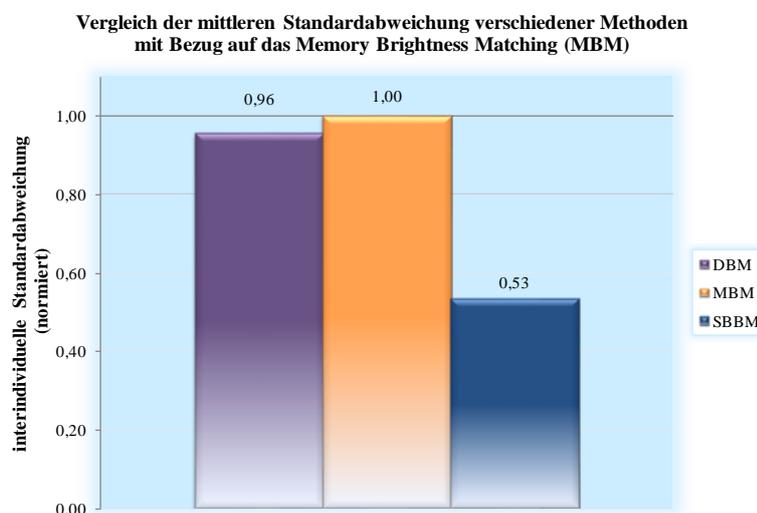


Abbildung 49: Methodenabhängiger Vergleich der Standardabweichungen (SD) für das DBM, MBM, SBBM

Fließen alle in dieser Studie erhobenen Werte ein, verändert sich der Wert der mittleren SD, bezogen auf den Transferwert der gedächtnisbasierten Methode, mit Anwendung der sukzessiv gewonnenen Abgleichwerte, auf nunmehr 53 %. Dies kann als Indiz dafür betrachtet werden, dass unter den betrachteten Prämissen die hier angewendete SBBM-Methode sehr viel exaktere Werte liefert, als eine nicht ausbalancierte direktvergleichende Methode (vgl. Kap. 4.1.3 & 4.2.1). Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein Ausgleich der betrachteten Verzerrungseffekte 47 % Verbesserung der MBM-Wertestreuung mit sich bringt, ist die Methode des SBBM vor diesem Hintergrund zu favorisieren. Weitere Forschungsarbeit zur Methodenbewertung ist jedoch nach wie vor unabdinglich.

Hinsichtlich der erhobenen Werte ist festzustellen, dass die Methode des MBM zu hohe Abweichungen vom Kriterium des NCT aufweist. Für die weitere Arbeit findet demzufolge die Methode des SBBM Anwendung. Die vorliegenden Diskrepanzen in der Einstellung gleicher Hellempfindung von Halogen* auf Halogen* sind in der Gesamtheit als so unbedeutend einzuschätzen, dass eine Gegensteuerung unnötig ist. Weiterhin kann sich der sukzessiv erstellte Abgleich durchaus mit den bereits stark etablierten Verfahrensweisen des MBM und des DBM messen. Die Streuung der Einstellwerte ist äußerst gering.

KAPITEL 9

UNTERSUCHUNGEN ZUM VERGLEICH DER HELLEMPFINDUNG MITTELS WAHRNEHMUNGSANGEPASSTER BEWERTUNGSSYSTEME

Im folgenden Kapitel sind die Forschungshypothesen und Ergebnisse der empirischen Hauptversuche dargestellt. Diesbezüglich liegen umfangreiche inferenzstatistische Auswertungen vor. Mit Anwendung der deskriptiven Statistik sind für die betrachteten Fälle aussagekräftige und anwendungsfähige Datensätze vorhanden. Eine Einschätzung der Güte durchgeführter Untersuchungen ist gegeben und wird durch eine Fehlerbetrachtung ergänzt.

Auf die Defizite einer allein $V(\lambda)$ -orientierten Bewertung wurde im Verlauf dieser Arbeit an unterschiedlichen Stellen eingegangen. Ziel ist es, durch wahrnehmungsangepasste spektrale Empfindlichkeitsfunktionen eine bessere Abbildung der Hellempfindung zu erlangen. Hierfür stehen die in Tabelle 8 zusammengefassten Bewertungssysteme zur Verfügung. Durch die eingeschlossene Betrachtung $V(\lambda)$ -basierter Größen ist es möglich, die Ergebnisse dieser Untersuchung in den Komplex existierender Studien vergleichend einzuordnen und einer Interpretation zu unterziehen.

Neben einer photopischen Betrachtungsweise stellen die existierenden „ergänzenden Systeme der Photometrie“ einen interessanten Betrachtungspunkt dar. Die empirisch gewonnenen Daten werden dementsprechend aufbereitet und entsprechend der Berechnungsvorschriften ausgewählter Systeme weiterverarbeitet. Es besteht die Zielsetzung, eine „mesopische“ Bewertung der erhobenen Daten durchzuführen und eine Gegenüberstellung mit schon existierenden Systemen der ergänzenden Photometrie zu vollziehen.

9.1 Forschungsansatz und -hypothesen

Die Zielsetzung des durchgeführten Hauptversuchs war es, Daten zur Überprüfung der Forschungshypothesen zu erhalten und gleichsam exaktere Mittelwerte als beim Pretest zu erheben. Die erhobenen Daten dienen gleichzeitig als Basis für eine später zu tätige Modellbildung einer mesopischen Hellempfindung und geben Orientierungshilfen für eine praktisch relevante Umsetzung in verschiedene Applikationen.

Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit anderen Studien wurde eine junge Probandengruppe gewählt und der bereits im vorherigen Kapitel beschriebene Versuchsablauf adaptiert. Vorerst wurde durch den Ausschluss älterer Versuchsteilnehmer der Entstehung des photopischen Normalbeobachters ($V(\lambda)$) entsprochen und somit ein gerontologischer Einfluss vermieden. Abschnitt 2.3 geht ausführlich auf die Hellempfindung betreffende, altersbedingte Einflussfaktoren ein. Um eventuelle altersbedingte Effekte einschätzen zu können, fand in einem wesentlich kleineren Nachversuch die Bewertung der zur Verfügung stehenden Reize durch ältere Probanden statt. Zusätzlich zu den genannten Variablen aus Tabelle 20 wurde der Einfluss des Alters und des Geschlechts betrachtet. Auch wenn es sich um Nebenauswertungen handelt, wurden die genannten Zwischensubjektfaktoren zuerst einer Auswertung unterzogen, um über eine Zusammenlegung der beiden Stichproben entscheiden zu können.

Durch die Simulation spektraler Verteilungen liegt für jede einstellbare Stimulusstufe das Spektrum vor. Für den angestrebten Vergleich einzelner Bewertungssysteme wird jede eingestellte Stufe mit der spezifischen spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion gemäß der in Kapitel 3.3 und 3.4 vermittelten Grundlagen gewichtet und geht in eine folgende Berechnung ein (vgl. Abbildung 1).

Für die Zwischensubjektfaktoren (Geschlecht, Alter) der Inferenzstatistik ergeben sich die Hypothesen, dass:

- durch die Veränderungen des visuellen Systems mit steigendem Alter ein Einfluss auf die Hellempfindung festzustellen ist. Die dargebotenen Reize werden in ihrer hellempfindungsauslösenden Eigenschaft je Altersgruppe verschieden wirken. Bei älteren Personen wird das äquivalente Leuchtdichteverhältnis geringer ausfallen als bei der jungen Stichprobe.
- es in Anbetracht der geschlechtsspezifischen Unterschiede theoretisch zu einer Beeinflussung der Hellempfindung kommen kann. Begründet ist dies durch das Vorkommen zweier spektraler L-Zapfen-Empfindlichkeitsmaxima bei Frauen gegenüber nur einem bei den Männern. Entsprechend des geringen Vorkommens einer Duplizität von L_{Serin} - und L_{Alanin} -Rezeptorsubtypen bei Frauen ist von einem Einfluss des Geschlechts, die genannten Merkmale betreffend nicht auszugehen. Eine Feststellung dieses Effekts ist zudem hinsichtlich der Genauigkeit des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Hellempfindung zu überprüfen.

Die visuelle Signalverarbeitung beginnt bei den Rezeptoren. Im mesopischen Wirkungsbereich interagieren beide Rezeptorarten dynamisch mit Veränderung des Adaptationsniveaus. Es liegt somit nahe, den Stäbchen und Zapfen eine besondere Bedeutung zuzuschreiben. Da die Rezeptortypen voneinander differierende spektrale Empfindlichkeiten aufweisen, ist es logisch, dass auch die spektralen Verteilungen jeweils unterschiedlich wahrgenommen werden. Einher geht dies mit einem nötigen Aktivierungslevel, welches durch ein Adaptationslevel bestimmt wird. Zusätzlich ist die räumliche Struktur der stimulierten retinalen Fläche zu beachten, also welche und wie viele Rezeptoren am eigentlichen Sehvorgang beteiligt sind. Alle drei Faktoren stellen sowohl separat, als auch in der Gesamtheit betrachtet (Interaktionseffekte) Einflussfaktoren für eine mesopische Hellempfindung dar.

Da die Hellempfindung als eine grundlegende Sehfunktion anzusehen ist, ist eine wahrnehmungsentsprechende Bewertung vorzunehmen. Auf die Defizite der $V(\lambda)$ -Funktion wurde bereits in Kapitel 4 hingewiesen. Für eine die menschliche Wahrnehmung abbildende Quantifizierung der Hellempfindung mit photopischen Größe sind entsprechende spektrale Empfindlichkeitsfunktionen zu nutzen. Diese unterschieden sich untereinander vor allem in ihrer Ausprägung hinsichtlich der Stimulusgröße, also dem aktivierten Netzhautareal, der Erhebungsmethode und -qualität sowie der Empfindlichkeit im kurzwelligen Bereich. Neben der Bewertung einer mesopischen Hellempfindung über $V(\lambda)$ -basierte Größen erfolgte die Zusammenstellung von Bewertungssystemen (Tabelle 8) mit anderen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen, um den im Versuch variierten Merkmalen der unabhängigen Variablen auch wahrnehmungspsychologisch zu entsprechen und ggf. angesprochene Defizite einer allein $V(\lambda)$ -orientierten mesopischen Hellempfindungsbewertung zu begegnen. Insgesamt ergeben sich aufgeführte Forschungshypothesen:

- Die Hellempfindung wird signifikant durch die stimulierte Netzhautgröße, das Leuchtdichteadaptationsniveau und die simulierte spektrale Verteilung beeinflusst.
- Mit abnehmendem Adaptationsniveau und zunehmendem kurzwelligen spektralen Anteil ist bei konstanter stimulierter Netzhautgröße eine Zunahme der Hellempfindung feststellbar (PURKINJE-Effekt).
- Eine Änderung der retinalen Fläche geht mit einer Veränderung in der Wahrnehmung der Helligkeit einher (Bewertungssystem I).
- Es werden drei Sehfeldgrößen untersucht und mittels wahrnehmungspsychologisch angepasster Empfindlichkeitsfunktionen (Bewertungssystem II & III) bewertet. Dadurch, dass diese auf die Variablen des Spektrums und des retinalen Reizareals eingehen, liegt keine Abhängigkeit der Hellempfindung dieser unabhängigen Variablen vor. Dies gilt insbesondere für das Bewertungssystem III, da der chromatische und achromatische Kanal bei deren Erstellung Berücksichtigung fanden.
- Für die Variable des Adaptationsniveaus ist ein Einfluss auf die Hellempfindung zu vermuten, da für die mesopische Darbietung eine photopische Spektralbewertung erfolgt.
- Durch das gewählte Forschungsdesign stellen sich geringere Standardabweichungen ein, als bei vorangegangenen Untersuchungen mittels anderer Methoden.

Zusammengefasst sind die betrachteten Versuchsabhängigkeiten in Tabelle 20 zu finden. Diese finden je Bewertungssystem eine individuelle Auswertung.

abhängige Variable	unabhängige Variable
Hellempfindung (operationalisiert durch $V_{eq, \%}$)	stimulierte Netzhautgröße
	Adaptationsleuchtdichte
	simuliertes Spektrum

Tabelle 20: Abhängige und unabhängige Variablen des Hauptversuchs

Weiterhin liegen ergänzend unterschiedlichste Systeme zur Berechnung einer äquivalenten Leuchtdichte im mesopischen Bereich vor. Die im Hauptversuch erhobenen Daten sollen in eine Modellauswahl der in der CIE 141 aufgeführten Ansätze einfließen, um die Vorhersagegenauigkeit eben dieses Berechnungssystem zu testen. Sollten die Abweichung der durch ein System berechneten und den vorliegenden empirisch ermittelten Leuchtdichten sehr klein sein, besitzt der betrachtete Modellansatz Gültigkeit und kann als empfehlenswert für die weitere Anwendung zur Einschätzung einer mesopischen Hellempfindung betrachtet werden.

9.2 Probandenkollektiv und Versuchsdurchführung

Insgesamt nahmen am Hauptversuch 27 Probanden teil, wovon drei Teilnehmer entweder den Ausschlusskriterien (Kapitel 8.2) unterlagen oder die Hellempfindung innerhalb einer akzeptablen Zeit nicht einzustellen vermochten. Die verbleibenden 24 Teilnehmer lassen sich in zwei Stichproben unterteilen. Der Hauptanteil von 19 Probanden, mit einem Durchschnittsalter von 25 Jahren [21;31], ist mit 10 Frauen und 9 Männern annähernd gleich verteilt. Eine ältere Vergleichsgruppe wird in einer zweiten Stichprobe betrachtet. Diese setzt sich aus vier Probanden und einer Probandin, mit einem Altersdurchschnitt von 54 Jahren [50;59], zusammen. Während bei der jungen Probandengruppe darauf geachtet wurde, den Einfluss von Sehhilfen auszuschließen, war dieser bei der Akquise älterer Probanden nicht auszuschließen. Sehhilfen waren in diesem Fall zugelassen.

Die Probanden rekrutierten sich aus Mitarbeitern der Hella KGaA Hueck & Co., des L-LABs und einer vorliegenden Probandendatenbank. Kein Teilnehmer wies ein übermäßiges Training an Hellempfindungsabweichen auf. Sie sind in diesem Sinn als unerfahren zu betrachten. Eine Vergütung externer Teilnehmer fand in Form eines Sachgeschenkes statt. Eine Reglementierung des Versuchs auf bestimmte Tageszeiten war nicht gegeben.

Der Versuchsablauf ist bereits in Kapitel 8.3 ausführlich erläutert. Für den Hauptversuch wurde eine neue Lampe in die dafür vorgesehene Einheit des OL 490 eingebaut und justiert. Weiterhin wurde durch die Implementierung einer zweiten Iterationsebene der Kalibrierung über das „SpecPack“ eine genauere Einstellung der Leuchtdichteadaptationsniveaus durchgeführt. Bezüglich der Nutzung der dritten Xenon-Höchstdruck-Lampe ergaben sich deutlich geringere Degradationseffekte von etwa 0,5 % je Versuchsdurchgang (1,5 Stunden) (vgl. Abbildung 34).

Insgesamt steht für die Auswertung ein Datensatz von 5760 Abgleichwerten zur Verfügung, der sich durch die Mittelwertbildung auf 1440 Datenpunkte reduziert.

9.3 Ergebnisse

Eine Ergebnisbewertung der Untersuchung mittels schließender und beschreibender Statistik erfolgt separat für jedes Bewertungssystem. Die durch einen Probanden eingestellten Spektren dienen somit jeweils als Berechnungsgrundlage für alle drei Bewertungssysteme. Daraus resultierend ergeben sich trotz einmal durchgeführter Abgleichvorgänge unterschiedliche äquivalente Leuchtdichtewerte in Abhängigkeit der Empfindlichkeitsfunktionen. Die Mittelwertbildung erfolgte analog zum beschriebenen Vorgehen aus Kapitel 8.4.

Auf Basis der vorliegenden Forschungshypothesen ist die Analyse von zwei Zwischensubjekt-faktoren (Geschlecht, Alter) zu prüfen. Weiterhin liegt eine metrische, abhängige Variable (Hellempfindung) und drei, diese beeinflussende, unabhängigen Variablen vor. Als Auswertungsmethode für das gewählte Design bietet sich die Varianzanalyse an. Grundlegend für die Anwendung der statistischen Auswertung mittels mehrfaktorieller Varianzanalyse unter Messwiederholungen (ANOVA) ist zum einen eine vorauszusetzende Normalverteilung und zum anderen eine Varianzhomogenität der Stichprobenvariablen.

Für einen Test auf Normalverteilung wurde der KOLMOGOROV-SMIRNOV-Anpassungstest durchgeführt. Dieser war mit Ausnahme einiger NCT-Abgleiche nicht signifikant, so dass die Normalverteilungsannahme nicht zurückgewiesen werden musste. Die verbleibenden neun Abgleiche der Referenz auf den Teststimulus Halogen* wurden mittels berechneter Häufigkeiten

einer grafischen Prüfung auf Normalverteilung unterzogen. Aufbauend auf dem Verlauf der GAUß'SCHEN-Normalverteilungsfunktion mit einem Häufigkeitsmaximum sowie dem symmetrischen Abfall der Häufigkeiten zu beiden Seiten sind auch die verbliebenen Datensätze als normalverteilt anzusehen.³⁴

Zur Prüfung der zugrunde gelegten Forderung nach Varianzhomogenität ist eine weitere Auswertung der Innersubjekteffekte auf Sphärizität vorzunehmen. Je Bewertungssystem erfolgte dies durch Anwendung des MAUCHLY-Tests. Es liegt für alle Variablen und deren Interaktionseffekte eine Signifikanz ($p \leq 0.01$) vor. Bezüglich einer folgenden statistischen Auswertung bedeutet dies, dass die „normale“ Varianzhomogenität nicht erfüllt ist. Daraus folgt die Nutzung von korrigierten Werten nach GREENHOUSE-GEISSER für die Bewertung der Innersubjekteffekte, also der Variableninteraktionen. Durch die Verwendung der GREENHOUSE-GEISSER-Korrektur ist einer konservativen Beurteilung von Signifikanzen entsprochen. [vgl. BACKHAUS ET AL. 2000]

Die Auswertung hinsichtlich Geschlecht und Alter wurde mittels der Zwischensubjektanalyse durchgeführt. Bei gegebenem Signifikanzniveau ($p \leq 0.05$) treten keine Zwischensubjekteffekte, das Geschlecht ($F_{(df=1)}=2.640, p \leq 0.05$) und die Altersgruppe ($F_{(df=1)}=.676, p \leq 0.05$) sowie deren Interaktion ($F_{(df=1)}=.505, p \leq 0.05$) betreffend, auf. Daher kann auf eine Differenzierung der Stichprobe bezüglich des Geschlechts und des Alters verzichtet werden. Es ergibt sich für die Gesamtstichprobe (24 Probanden) ein neuer Altersdurchschnitt von 31 Jahren. Die Hypothese hinsichtlich eines Einflusses des Alters auf die Hellempfindung kann nicht bestätigt werden. In angesprochenen Untersuchungen (Kap. 2.3 & 4.1.1) wird jedoch von einer Einflussnahme ausgegangen. Aus diesem Widerspruch ergeben sich zwei Betrachtungsansätze. Zum einen ist die Vergleichsgruppe mit fünf Probanden relativ klein, zum anderen üben die angesprochenen gerontologischen Aspekte, wenn vorhanden, erst im höheren Alter einen signifikanten Einfluss auf die Hellempfindung aus.

Ebenfalls wird die Hypothese eines Einflusses des Geschlechts und somit des veränderten Rezeptorvorkommens nicht bestätigt. Eine Erklärung dieses Ergebnisses kann in folgendem Sachverhalt formuliert werden: Die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der L_{Serin} - und L_{Alanin} -Zapfen unterscheiden sich in ihren Maxima um $\lambda=3$ nm. Bezogen auf die vorkommenden Standardabweichungen eines Helligkeitsabgleichs ist ein solch gearteter Einfluss nur schwer nachzuweisen. Des Weiteren ist die in Kapitel 7 aufgeführte spektrale Messunsicherheit von $\pm 2,4$ nm hinzuzuziehen, was eine nicht zufallsbasierte (signifikante) Nachvollziehbarkeit der genannten Hypothese als äußerst schwierig erscheinen lässt.

Bewertungssystem I

Innerhalb des $V(\lambda)$ -Bewertungssystems liegen die Hellempfindungsabgleiche gemäß einer Wichtung mit dem photopischen 2° -Normalbeobachter vor. Eine Differenzierung bezüglich stimulierter Netzhautgrößen erfolgt nicht. Betrachtet man die Haupteffekte, ist der Variableneinfluss der stimulierten Netzhautgröße ($F_{(df=1,435)}=13.975, p \leq 0.01$), das vorherrschende Leuchtdichteadaptationsniveau ($F_{(df=1,847)}=6.479, p \leq 0.01$) und das simulierte Spektrum ($F_{(df=1,476)}=143.791, p \leq 0.01$) auf das Hellempfinden hochsignifikant. Entsprechend der geäußerten Forschungshypothese ist dies im Einzelnen durch die in dieser Arbeit angeführten theoretischen Ansätze nachvollziehbar.

³⁴ Darüber hinaus ist anzumerken, dass die ANOVA gegenüber Verletzung des Kriteriums der Normalverteilung sehr robust ist. [vgl. BACKHAUS ET AL. 2000]

Die Verteilung der Rezeptoren über die Retina ist nicht konstant. Durch eine allein $V(\lambda)$ -orientierte Bewertung ist, unabhängig von der Stimulusgröße, nur ein 2° -Areal (foveal) an der Hellempfindung berücksichtigt. Vorgänge innerhalb der visuellen Signalverarbeitung ändern sich jedoch mit der Stimuluspräsentationsfläche. Würde eine Gültigkeit von $V(\lambda)$ über alle stimulierten Netzhautgrößen, also eine wahrnehmungsgetreue Abbildung des Hellempfindens vorliegen, dürften keine Veränderungen der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse mit Variation der Stimulusgröße erfolgen. Dass $V(\lambda)$ diese rezeptorverteilungsbegründeten Effekte nicht kompensiert, ist anhand der Abgleichkondition bei $L=10 \text{ cd/m}^2$ ersichtlich. Bei diesen erfolgten Abgleichen im photopischen Bereich sind nur Zapfen aktiv, welche die Hellempfindung beeinflussen können. In der Ergebnisgegenüberstellung fällt auf, dass die äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse mit zunehmender stimulierter Netzhautgröße abnehmen, was den Schluss zulässt, dass kleine, foveal dargebotene Flächen bei gleicher Leuchtdichte heller wahrgenommen werden als große Sehzeichen. Vorgänge größerer stimulierter Netzhautareale werden von einer $V(\lambda)$ -Bewertung nicht berücksichtigt. Der auftretende, jedoch nicht korrekt wiedergegebene Effekt könnte in einer Regulierung des Hellempfindens über ein Verhältnis der stimulierten, retinalen Gesamtfläche zur im Versuch verbleibenden empfindungslosen Fläche Begründung finden. Würde dem Menschen eine kleine leuchtende Fläche zur übrigen lichtlosen retinalen Fläche dargeboten, könnte das Auge mit einer Art Empfindungsüberschwingen oder einer Dämpfung bei inverser Annahme, auf das Hellempfinden reagieren. Inwiefern ein Einfluss von perzeptiven Feldern oder der peripheren Rezeptorverschaltung gegeben ist, muss in weiteren Versuchen geklärt werden. Hinsichtlich einer korrekten Wiedergabe der Hellempfindung durch Empfindlichkeitsfunktionen, jedoch unter Einbezug der chromatischen Luminanzkomponente, ist auf das Bewertungssystem III verwiesen. Die berechnete Effektstärke $\eta^2=.034$ kennzeichnet einen mittleren bedeutsamen Effekt der Variablen stimulierte Netzhautgröße [vgl. SEDLMEIER ET AL. 2008]. In einem folgenden BONFERRONI-Posthoc-Test zeigt sich kein signifikanter Unterschied ($p=.171$) zwischen der stimulierten Netzhautgröße bei $1,25^\circ$ und 10° .

Die Funktion der Rezeptoren hängt stark vom Adaptationslevel ab. Vom photopischen, über das mesopische bis zum skotopischen Sehen verändern sich die vorherrschenden Adaptationsleuchtdichten und damit die Arbeitsweise der Stäbchen und Zapfen. Die $V(\lambda)$ -Funktion spiegelt das Verhalten des achromatischen Zapfenkanals wider. Es wurde aufgezeigt, dass die Entstehungsbedingungen für die genannte Hellempfindungsfunktion zwar den oberen mesopischen Adaptationsbereich umfassen, jedoch in deren Zusammensetzung nur eine statische Funktion abbilden. Die Gültigkeit von $V(\lambda)$ für einen photopischen Adaptationszustand wird allerdings für die vorliegende statistische Auswertung als gegeben betrachtet. Infolge der unterschiedlich dargebotenen Adaptationsniveaus ist von einer Veränderung der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse über L_{ad} auszugehen. Dies zeigt sich in einem signifikanten Variablenzusammenhang zwischen Leuchtdichteadaptationsniveau und Hellempfindung von ($F_{(df=1,847)}=6.479, p \leq .01$) bei geringer Effektstärke von $\eta^2=.004$.

Um ein vielfaches höher stellt sich der signifikante Einfluss der spektralen Verteilung dar ($F_{(df=1,476)}=143.791, p \leq .01$). Durch die vorliegende Empfindlichkeitsfunktion werden kurzwellige Spektren unterbewertet. Weiterhin zeigt sich deutlich, dass eine gemessene Leuchtdichte nicht einer Hellempfindung entspricht. Der schon angesprochene Einfluss eines chromatischen Luminanzkanals der Zapfen zum achromatischen Luminanzkanal, welcher die $V(\lambda)$ -basierte Leuchtdichte wiedergibt, kann als gegeben angesehen werden. Auch bei den vorliegenden breitbandigen Spektren eines „Weißbereichs“ sind chromatische Effekte nicht auszuschließen. Im Übrigen spielen die beteiligten Rezeptoren und deren Signalverarbeitungsprozesse eine wichtige Rolle. Bei vorliegenden mesopischen Reizleveln sind vier Rezeptortypen am Erzeugen einer

Hellempfindung beteiligt, welche ihrerseits nur für bestimmte spektrale Bereiche und Reizintensitäten empfindlich sind. Je nach spektraler Komposition findet eine Erregung statt und übt einen Einfluss auf die Hellempfindung aus. Die spektralen Unterschiede haben gegenüber der abhängigen Variable einen großen Effekt ($\eta^2=.528$) bei der Varianzaufklärung.

Interessanter stellen sich die Interaktionseffekte 1. Grades dar, welche die Arbeitsweise des visuellen Systems am ehesten versinnbildlichen. Beschränkung finden diese durch $V(\lambda)$ und deren Restriktionen bezüglich einer photopischen Gültigkeit für 2° Sehzeichen und deren besagte spektrale Unzulänglichkeiten. Im Hauptversuch ändern sich die spektralen Empfindlichkeiten je Leuchtdichteadaptationslevel sowie die relativen Anteile der Rezeptorenmenge zueinander über den jeweils stimulierten Bereich. Dies wird durch das Bewertungssystem I nicht abgebildet und es ergibt sich ein hochsignifikanter Einfluss der Adaptationsleuchtdichte in Verbindung mit der stimulierten Netzhautgröße auf die Hellempfindung ($F_{(df=3,317)}=20.249, p \leq .01$). Die mittlere Effektstärke beträgt $\eta^2=.012$. Durch die Einschränkung auf $\alpha=2^\circ$ werden visuelle Prozesse und Rezeptorstrukturen aus dem peripheren Bereich nicht berücksichtigt. Der Einfluss der Macular Pigmentierung bei $V(\lambda)$ wird auf größere Stimuli übertragen und senkt damit insbesondere die spektrale Empfindlichkeit im kurzwelligen Bereich auch bei größeren Stimuli. Somit sollte ein Interaktionseffekt der Variablen Spektrum und Adaptationsleuchtdichte vorhanden sein. Dieser stellt sich als signifikant dar ($F_{(df=5,515)}=2.951, p \leq .05$), jedoch durch den eingeschränkt untersuchten oberen mesopischen Bereich mit geringer Effektstärke ($\eta^2=.002$). Durch Zunahme der Variable stimulierte Netzhautgröße ergibt sich ein abgerundetes Bild (Interaktion 2. Grades), wobei alle Variablen, welche einen Einfluss auf die mesopische Hellempfindung haben, betrachtet sind und sich in ihrer Gesamtheit als signifikant darstellen ($F_{(df=9,182)}=5.173, p \leq .01$).

Im Gegensatz zu der Bewertung der Variableninteraktion sind genaue Abgleichwerte des Teststimulus bezogen auf die Referenz für die einzelnen Stimuli in folgender Abbildung zu finden. Ausgewertet sind die jeweiligen äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse einzelner simulierter Spektren je stimulierte Netzhautgröße. Diese geben an, um wie viel geringer oder höher das Testspektrum unter $V(\lambda)$ -Bezug hinsichtlich der Referenz eines Leuchtdichteadaptationslevels eingestellt wurde.

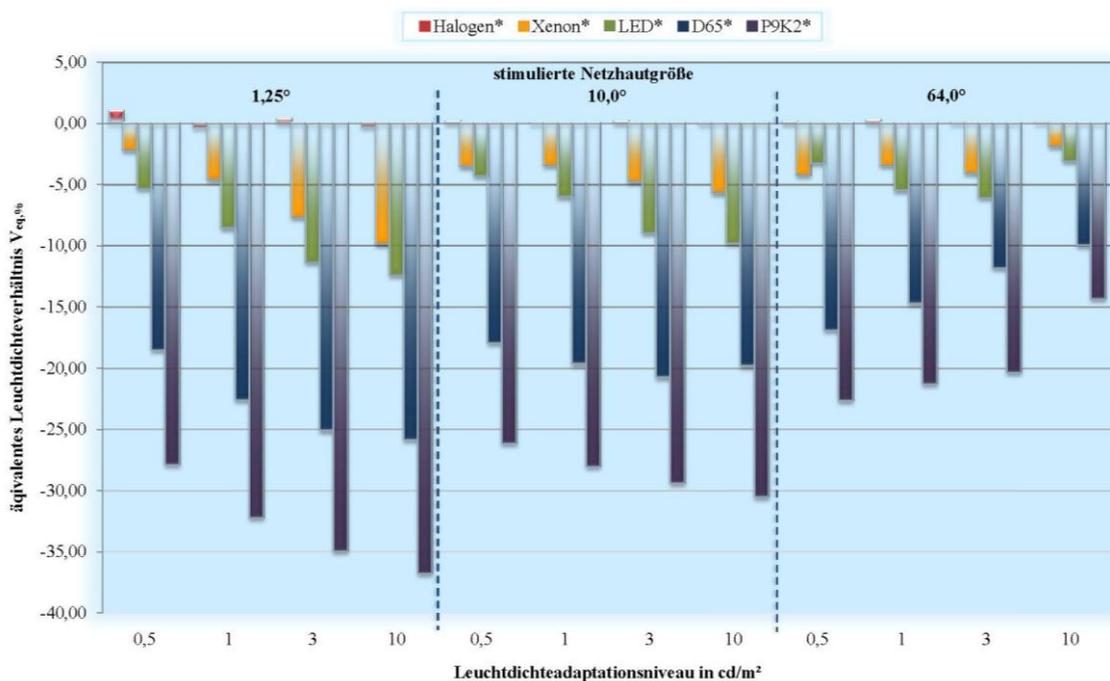


Abbildung 50: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungssystems I ($V_{eq, \%}$: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis; vgl. Datentabelle Tabelle 29)

Deutlich ist auf den ersten Blick ein Umschwingen von $V_{eq,\%}$, insbesondere bei den simulierten Spektren D65* und P9K2*, über die stimulierten Netzhautgrößen zu erkennen. Während bei $1,25^\circ$ ein stetiger Anstieg der Werte mit zunehmendem Leuchtdichteadaptationsniveau zu verzeichnen ist, nimmt dieser bei 10° ab und kehrt sich in der Verlaufsrichtung bei $\alpha=64^\circ$ um. In der Zone von $1,25^\circ$ kann von einer Stäbchenfreiheit gesprochen werden (Kap. 2.1). Mit zunehmendem Leuchtdichteadaptationsniveau nimmt gleichsam die Zapfenaktivität zu. Der PURKINJE-Effekt liegt also nicht vor. Ein stetiger Anstieg der Hellempfindung ist unter dieser Voraussetzung nachzuvollziehen. Etwas relativiert zeigt sich das Bild bei der nächstgrößeren stimulierten Netzhautgröße, bei welcher Stäbchen und Zapfen aktiv sind. Zwar ist insbesondere bei LED* und P9K2* noch ein leichter Anstieg in der Hellempfindung mit größerer Adaptationsleuchtdichte zu verzeichnen, jedoch im Anstieg geringer als bei $\alpha=1,25^\circ$. Mit Bezug auf die Verteilung der Rezeptordichte (Abbildung 6), ist bei ca. 14° Exzentrizitätsradius eine Gleichverteilung der Anzahl an Stäbchen und Zapfen erkennbar. Dies lässt die Vermutung zu, dass sich ausgehend von dem Bild bei $\alpha=10^\circ$ ein Bewertungsplateau über die untersuchten Adaptationsniveaus ergibt. Entsprechend der dargelegten Rezeptoreigenschaften wird sich bei weiter sinkenden Adaptationsleuchtdichten spektrenspezifisch ein PURKINJE-Effekt einstellen. Dieser findet sich bereits bei 64° Stimulusgröße wieder. Es überwiegt die Stäbchenanzahl. Bei stark kurzwelligen Spektren (D65*, P9K2*) ist der genannte Effekt sofort sichtbar. Einzige Ausnahme bildet das LED* Spektrum, welches bei $L=3,0 \text{ cd/m}^2$ ein Maximum aufweist. Eine ähnliche Unstetigkeit ist auch bei Xenon* ($L=1,0 \text{ cd/m}^2$) zu erkennen. Eine mögliche Erklärung dieses Verhaltens ist in der Veränderung der spektralen Empfindlichkeit zu suchen. Während des Versuchs wird die Adaptationsleuchtdichte in den mesopischen Bereich abgesenkt. Damit verschiebt sich die photopische spektrale Hellempfindlichkeit, in diesem Fall $V(\lambda)$, hin zu $V'(\lambda)$. Durch die Veränderung von L_{ad} berücksichtigt das Maximum einer angenommenen mesopischen spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionverschiebung jeweils andere Spektralbereiche des simulierten Spektrums. Daraus resultiert, dass das visuelle System dem LED*-Spektrum in diesem Falle eine höhere Hellempfindung zuweist und der Proband eine geringere Helligkeit einstellt. Somit sind die spektralen Wichtungen durch die Verwendung der photopisch gültigen $V(\lambda)$ -Funktion jeweils verschieden und daraus resultierend auch die Hellempfindung. Vergleichbares lässt sich anhand der noch stärker separierten spektralen Verteilung von Xenon* erkennen, während dies bei kontinuierlichen spektralen Verteilungen nicht pauschal nachweisbar ist.

Für einen explorativen Ansatz kann ausgeführt werden, dass mit einer weiteren Abnahme der Leuchtdichteadaptationsniveaus der PURKINJE-Effekt verstärkt auftritt und dieser auch bei einer stimulierten Netzhautgröße von $\alpha=10^\circ$ sichtbar gemacht werden kann.

Bewertungssystem II

Folgend soll in einem zweiten Bewertungssystem der Einfluss der stimulierten Netzhautgröße auf die Hellempfindung mittels an die Reizfläche angepasster spektraler Empfindlichkeitsfunktionen bewertet werden (vgl. Hypothese Kapitel 9.1). Durch die Nutzung von $V(\lambda)$ verschiedener Empfindlichkeitsfunktionen sind auch deren Spezifika hinsichtlich der Empfindlichkeitsmaxima zu beachten. Damit der Definition der Einheit *Candela* entsprochen wird, ist je Maximum der gewählten spektralen Empfindlichkeitsfunktion ein separates photometrisches Strahlungsäquivalent berechnet worden (vgl. Kapitel 3.3). Die im Versuch dargebotene Referenz und die Testspektren wurden ausschließlich mit den von $V(\lambda)$ -verschiedenen spektralen Empfindlichkeiten sowie den zugehörigen Strahlungsäquivalenten (Tabelle 8) berechnet. Aufgrund dieses Schrittes ergeben sich systemeigene Leuchtdichten für das vorliegende Bewertungssystem II wie auch folgend für das

Bewertungssystem III. Sie beruhen jedoch wie bei allen gewählten Bewertungssystemen auf den im Versuch dargebotenen spektralen Verteilungen. Ein spektraler Abgleich konnte somit über die Empfindlichkeitsfunktionen in das jeweilige Bewertungssystem und deren systemeigene Leuchtdichte umgewandelt werden. Innerhalb dieses Abschnitts zu Bewertungssystem II wurden die Versuchsergebnisse mit einem Mischsystem spektraler Empfindlichkeitsfunktionen bewertet, welches sich aus zwei Kurven ($V_2^*(\lambda)$; $V_{10}^*(\lambda)$), ermittelt mittels FP, und aus einer Funktion ($V_{K64}(\lambda)$), erhoben mittels DBM, zusammensetzt. Die im Bewertungssystem II genutzten Empfindlichkeitsfunktionen zeichnen sich durch eine die jeweilige Stimulusgröße berücksichtigte Erhebung sowie eine stärkere Bewertung kurzweiliger Spektralanteile aus. Die folgende Analyse stützt sich auf die schon im Bewertungssystem I betrachteten Hypothesen und ausführlich dargestellten Grundlagen. Eine vergleichende Beurteilung findet darauf aufbauend statt.

Während der Datenanalyse mittels MAUCHLY-Test wurde ersichtlich, dass eine Korrektur des Signifikanzkriteriums der Innersubjekteffekte nötig ist. Trotz Nutzung neuerer Empfindlichkeitsfunktionen, welche eine Anpassung an die getroffenen Versuchsbedingungen bilden, ändern sich die Einflüsse und Interaktionen der unabhängigen Variablen auf die Hellempfindung kaum. Bezüglich der stimulierten Netzhautgröße ($F_{(df=1,440)}=38,185$), des Adaptationsniveaus ($F_{(df=1,841)}=5,764$) und des simulierten Spektrums ($F_{(df=1,439)}=91,381$) ergibt sich eine Signifikanz von $p \leq .01$. Entsprechend des durchgeführten BONFERRONI-Tests stellt sich nunmehr ein signifikanter Einfluss aller stimulierten Netzhautgrößen auf die Hellempfindung heraus ($p \leq .01$). Konformität zur aufgestellten Hypothese, dass durch eine stimulusgrößenangepasste Bewertung keine Abweisung der Nullhypothese, also eine Gleichbewertung der Hellempfindung über die stimulierten Netzhautgrößen, stattfindet, ist nicht gegeben. Ein Bewertungssystem, welches die Hellempfindung in Abhängigkeit von der Stimulusgröße korrekt bewertet, dürfte keine signifikante Abhängigkeit bezüglich dieses Effekts aufweisen. Ausgehend von den mittels BONFERRONI-Test erhobenen Werten, kann im Vergleich der vorliegenden Ergebnisse bezogen auf Bewertungssystem I (kein signifikanter Unterschied zwischen den Variablenausprägungen $1,25^\circ$ und 10° der stimulierten Netzhautgröße) die Notwendigkeit zur Nutzung stimulusgrößenangepasster Empfindlichkeitsfunktionen aufgezeigt werden. Eine oftmals leuchtdichtemesstechnisch bedingte 2° -normalbeobachterbasierte Messung gibt somit keine wahrnehmungsabbildende Größe, bezogen auf das stimulierte Netzhautareal, wieder. Dies bedeutet insbesondere für den Fall einer Leuchtdichtemessung ($V(\lambda)$) im mesopischen Bereich, dass eine 2° -basierte Messung für ein 10° -basiertes Anwendungsfeld gleiche Messwerte liefert, diese jedoch aus Sicht der an einer visuellen Wahrnehmung beteiligten Rezeptoren wenig vertrauenswürdig erscheinen (vgl. Abbildung 51, oben).

Die Interaktionseffekte den 1. und 2. Grad betreffend, zeichnet sich ein ähnliches Bild wie beim photopischen Normalbeobachter ab (Bewertungssystem I). Aufschlussreicher stellt sich ein Blick auf die Entwicklung der Effektstärken dar. Die stimulierte Netzhautgröße zeichnet sich durch eine Erhöhung der Effektstärke auf $\eta^2=.101$ aus und deren Interaktionseffekt mit dem simulierten Spektrum auf $\eta^2=.065$. Eine erhöhte Varianzaufklärung durch die Verwendung angepasster spektraler Empfindlichkeitsfunktionen, wie hier angewandt, ist somit gegeben. Hinsichtlich des simulierten Spektrums ergibt sich zwar immer noch ein großer Effekt, jedoch sinkt die Effektstärke um knapp ein Drittel auf $\eta^2=.375$. Folglich bestätigt sich die Auffassung, dass durch eine Mehrbewertung kurzweiliger Spektralanteile und eine Berücksichtigung des chromatischen Luminanzeffekts durch $V_{K64}(\lambda)$, eine geringere Varianzaufklärung auf die Variable Spektrum entfällt. Die auf die verbleibenden untersuchten Fälle entfallenden Effektstärken unterliegen nur einer marginalen Änderung zum Bewertungssystem I. Eine Darstellung der sich verändernden äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse als Beschreibung der Hellempfindung ist folgend aufgeführt.

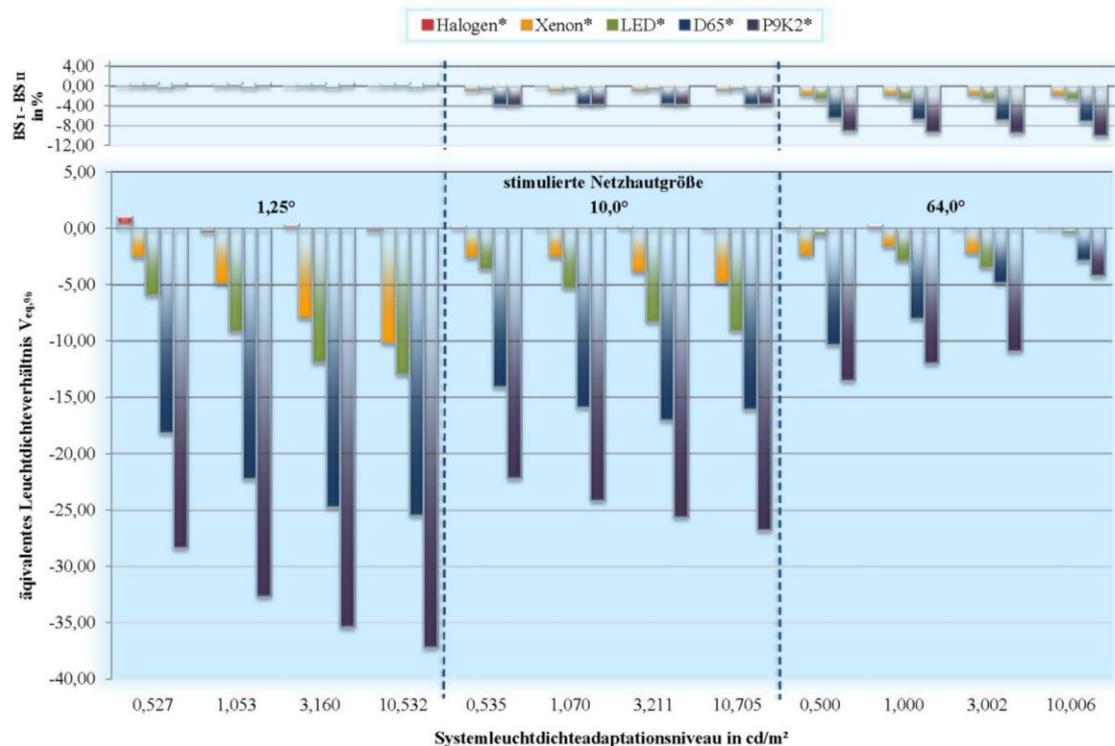


Abbildung 51: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungssystems II ($V_{eq,\%}$: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis; vgl. Datentabelle Tabelle 30)

Vergleichend mit Bewertungssystem I lässt sich keine gravierende Veränderung der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse für die Stimulusgröße von $1,25^\circ$ hinsichtlich des vorliegenden Bewertungssystems erkennen. Durch die Verwendung von $V_2^*(\lambda)$ und der damit verbundenen Potentiale lässt sich ein maximaler Unterschied im Intervall von $\pm 0,6\%$ feststellen (vgl. Abbildung 51, oben). $V(\lambda)$ kann also trotz der schon diskutierten Defizite im kurzwelligen Bewertungsbe- reich des Spektrums erstaunlich gut auf breitbandige spektrale Verteilungen angewendet werden. Für die Interpretation vorliegender Unterschiede soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass es durch die Verwendung unterschiedlicher Empfindlichkeitsfunktionen zu einer Veränderung der äquivalenten Systemleuchtdichteverhältnisse kommt. Je nach Spektrum werden mehr oder weniger relevante spektrale Strahldichten der Referenz- und Teststimuli durch die jewei- ligen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen bewertet. Für die Referenz Halogen* ergibt sich unter Verwendung von $V_2^*(\lambda)$ beispielsweise eine Systemleuchtdichte von $L_{2^*}=0,527\text{ cd/m}^2$. Dieser erhöhte Wert resultiert aus der erhöhten Empfindlichkeit im kurzwelligen Spektralabschnitt. Fallen je simuliertem Spektrum mehr energiereiche Spektrenabschnitte unter die durch $V_2^*(\lambda)$ stärker bewerteten Bereiche (verglichen mit $V(\lambda)$), erhöht sich auch die äquivalente System- leuchtdichte für das Testspektrum. Somit ergibt sich für das äquivalente Leuchtdichteverhältnis ein höherer negativer Wert, wenn eine spektrale Mehrbewertung durch die Hellempfindlich- keitsfunktion kaum vorhanden ist; ein kleineres negatives Verhältnis stellt sich ein, wenn eine relevante Mehrbewertung stattfindet. Erstgenanntes tritt beispielsweise bei Xenon* auf ($L_{2^*,eq}=0,513\text{ cd/m}^2$; $V_{eq,\%}=-2,5\%$), letzteres ist bei D65* ($L_{2^*,eq}=0,431\text{ cd/m}^2$; $V_{eq,\%}=-18,2\%$) der Fall, welches ein kontinuierliches Spektrum aufweist. Da die Veränderung spektrenspezi- fisch ist, können sich jeweils unterschiedliche Ausprägungen der bewertungssystembasierten Unterschiede ergeben.

Hinsichtlich der stimulierten Netzhautgröße bei 10° des Bewertungssystems II sind weit größere Effekte herauszuheben. Die nunmehr durch eine 10° -basierte spektrale Hellempfindlichkeits- funktion abgedeckten Spektralbereiche unterscheiden sich stark von jenen der bisher untersuch-

ten 2°-basierten des Bewertungssystems I (vgl. Abbildung 51, oben, 10°). Es zeigt sich eine Tendenz dahingehend, dass eine eindeutige Mehrbewertung, insbesondere kurzweiliger Spektralanteile der Testspektren, stattfindet, welche zu einer Dämpfung der Unterschiedeverhältnisse ($V_{eq,\%}$) über alle simulierten Spektren führt. Die Unterschiede zur Referenz werden also geringer, wodurch deutlich wird, dass bereits eine Verwendung von den stimuluseigenschaftenangepassten Empfindlichkeitsfunktionen die Hellempfindung besser abbildet. Im Allgemeinen spricht dies für eine sehufgabenangepasste Verwendung von spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen jenseits von $V(\lambda)$.

Bei Betrachtung des Falls bei $\alpha=64^\circ$ stellt sich sofort ein feststellbarer Unterschied dar. Zwar sind die $V_{eq,\%}$ von geringerer Ausprägung als bei den anderen Stimulusgrößen, jedoch ist ein PURKINJE-Effekt immer noch feststellbar. Während für die Verläufe bei den verbleibenden stimulierten Netzhautgrößen die Annahmen aus Bewertungssystem I übernommen werden können, ist ein Einfluss der genutzten spektralen Empfindlichkeitsfunktion $V_{K64}(\lambda)$ mit chromatischem und achromatischem Luminanzbeitrag (DBM/HCBM-Methode) deutlich sichtbar. Es gilt somit auch, die Effekte der Erhebungsmethode spektraler Empfindlichkeitsfunktionen zu berücksichtigen. Eine Auswertung zu $V_{K64}(\lambda)$ erfolgt im Bewertungssystem III.

Bewertungssystem III

Kennzeichnend für das dritte Bewertungssystem ist eine Zusammenstellung dreier spektraler Hellempfindlichkeitsfunktionen ($V_{B2}(\lambda), V_{B10}(\lambda), V_{K64}(\lambda)$), gewonnen mittels der Erhebungsmethode des Direktvergleichs und deren Übereinstimmung mit den gewählten stimulierten Netzhautgrößen des Hauptversuchs. Aus der Erhebungsmethode resultierend ist sowohl der chromatische als auch der achromatische Einfluss auf den Luminanzkanal charakteristisch. Dieses Verhalten ist bei der gewählten Abgleichmethode des SBBM ebenfalls vorhanden und das Auswahlkriterium für die in diesem Bewertungssystem zusammengestellten Empfindlichkeitsfunktionen bildet.

Hinsichtlich der inferenzstatistischen Auswertung ergeben sich auch für das vorliegende System durchzuführende Sphäritätskorrekturen auf die zu testenden Signifikanzlevel der Variableninteraktionen. Analog zu den Ergebnissen aus den Bewertungssystemen I und II stellen sich die Signifikanzen aller betrachteten Variablen dar. Die Haupteffekte zeigen sich als hochsignifikant ($p \leq .01$) für die stimulierte Netzhautgröße ($F_{(df=1,456)}=46.428; \eta^2=.127$), das Leuchtdichteadaptationsniveau ($F_{(df=1,838)}=5.628; \eta^2=.004$) und die simulierten Spektren ($F_{(df=1,419)}=76.564; \eta^2=.337$). Ein Vergleich der Effektstärken zu Bewertungssystem I erfolgt äquivalent zu jenem von Bewertungssystem II auf I. Stellt man demzufolge System III dem System II gegenüber, verbessert sich die Varianzaufklärung der Variable stimulierte Netzhautgröße weiter (von $\eta^2_{II}=.101$ auf $\eta^2_{III}=.127$). Dies mag an den Besonderheiten der zum Tragen kommenden spektralen Empfindlichkeitsfunktionen aus den Erhebungsmethoden FP und DBM liegen. Gleiches äußert sich bezogen auf die Variable simuliertes Spektrum, wobei eine geringere aufzuklärende Varianz auf dieses Kriterium entfällt ($\eta^2_{II}=.375; \eta^2_{III}=.337$). Mittlere Effektstärken zeigen sich auch bei den Interaktionseffekten 1. Grades mit $\eta^2=.014$ für die Sehzeichengröße und das Adaptationsniveau ($F_{(df=3,329)}=19.902; p \leq .01$), $\eta^2=.059$ für die stimulierte Netzhautgröße und dem Spektrum ($F_{(df=2,986)}=34.321; p \leq .01$) sowie der verbleibenden Interaktion mit $\eta^2=.002$ ($F_{(df=5,341)}=2.745; p \leq .05$). Es stellt sich wiederum die verbleibende Interaktion aller unabhängigen Variablen auf die Hellempfindung, aus wahrnehmungspsychologischer Sicht, für die weitere Forschungsarbeit als wichtigste dar ($F_{(df=9,049)}=5.52; p \leq .01; \eta^2=.006$). Anhand der vorliegenden Daten ergibt sich der in Abbildung 52 dargestellte Verlauf.

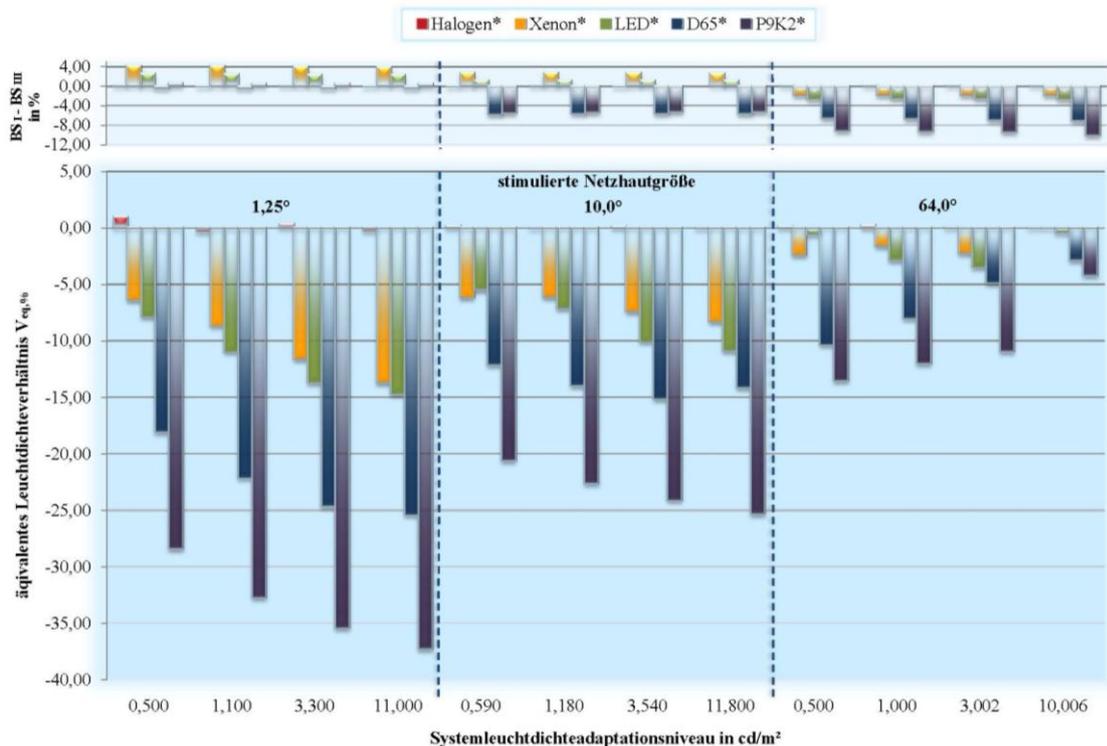


Abbildung 52: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungssystems III ($V_{eq,\%}$: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis; σ : Standardabweichung; grau: mittels der jeweiligen spektralen Empfindlichkeitsfunktion und deren spezifischem photometrischen Strahlungsäquivalent berechnete Adaptationsleuchtdichte; vgl. Datentabelle Tabelle 31)

Deutlich fallen auch bei Nutzung des Bewertungssystems III die bereits bekannten Verläufe betrachteter Hellempfindungen auf. Bei genauerer Datenanalyse wird deutlich, dass ein „Zusammenrücken“ der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse gegeben ist, welches bedingt ist durch die Charakteristik der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen und folglich auf den Einfluss des chromatischen Anteils auf den achromatischen Luminanzkanal zurückzuführen ist. Insbesondere betrifft dies die simulierten Spektren Xenon* und LED* bei den stimulierten Netzhautgrößen $1,25^\circ$ und 10° . Die Ursache hierfür ist unter anderem sicherlich in den deutlich höheren Bezugswerten der Referenz Halogen*, bewertet mit der jeweiligen spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion, zu suchen. Im Vergleich zu den verbleibenden Spektren, welche sich durch eine starke Breitbandigkeit auszeichnen und solcher Veränderungseffekt nicht feststellbar ist, kann auf die unter Bewertungssystem II beschriebene Erklärung zurückgegriffen werden.

9.4 Untersuchungsgüte

Die Reliabilität (Zuverlässigkeit) bildet die Voraussetzung für die Validität (Gültigkeit) einer Untersuchung. Neben der durchgeführten Randomisierung der Variablendarbietung und somit der Vermeidung von möglichen systematischen Einflüssen auf die Einstellungen der Probanden, ist die Erzeugung des zur Datenauswertung genutzten Mittelwerts zu beachten. Je zwei alternierende, oberschwellige und unterschwellige Abgleiche sind für die Berechnung eines Abgleichmittelwerts herangezogen. Durch dieses Vorgehen ist einer möglichen Streuung der Werte hinreichend entgegengewirkt und ein zuverlässiger Mittelwert konnte erzeugt werden. Diese ergaben zusammengefasst einen Gesamtmittelwert je Abgleichkondition für die betrachtete Stichprobe von 24 Probanden. Zusätzlich gilt es, eine eventuelle Verzerrung der Hellempfindungsabgleiche über auftretende Versuchseffekte festzustellen, um diesen entgegenwirken zu

können. Im Pretest fand dies über das Kriterium des Null-Condition-Tests (NCT) statt. Dieser ist auch im Haupttest Bestandteil der Probandenabgleiche. In Abbildung 53 ist zu erkennen, dass die maximale Abweichung der Einstellung einer Hellempfindung von Halogen* auf die Referenz bei $V_{eq,\%}=1\%$ liegt. Alle weiteren NCT's liegen bei $V_{eq,\%}<\pm 0,35\%$. Die vorliegenden Werte verdeutlichen, dass es den Probanden bei der kleinsten Adaptationsleuchtdichte und stimulierten Netzhautgröße am schwersten fiel, einen Helligkeitsabgleich gleicher Spektren zu vollziehen. Dennoch stellen sich die festgestellten Abweichungen als so gering dar, dass dies, wie schon im Pretest, für das verwendete Versuchsdesign spricht und eine Korrektur der Werte nicht stattzufinden hat.

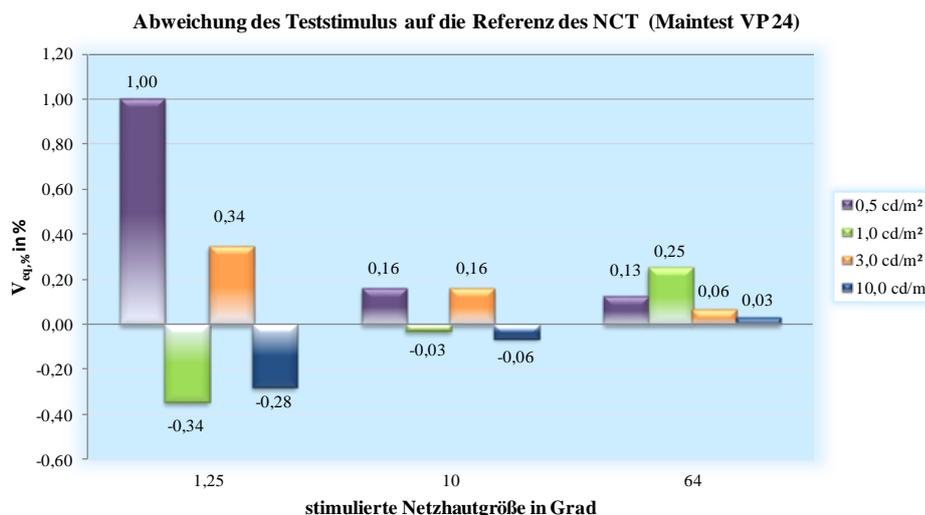


Abbildung 53: Ergebnisse des NCT (Maintest) der Methode SBBM (VP: Versuchsperson)

Weiterhin sind die Daten auf eventuell vorkommende systematische Abweichungen zu überprüfen. Dies erfolgt anhand der simulierten Spektren in Relation zu den verbleibenden Untersuchungsvariablen stimulierte Netzhautgröße und Leuchtdichteadaptationsniveau. Es wurden paarweise Vergleiche der einzelnen Abgleichvorgänge (je vier) durchgeführt. Tritt der Fall eines signifikanten Unterschieds aller Vergleichspaare einer betrachteten Kondition untereinander auf, kann dies als Indiz für eine Unzulänglichkeit innerhalb des Versuchs betrachtet werden. Bis auf zwei Auffälligkeiten stellen sich die verbleibenden paarweisen Vergleiche als nicht signifikant dar. Benannte signifikante Abweichungen stellen sich bei dem Abgleich von Halogen* bei $L_{ad}=0,5\text{ cd/m}^2$ und einer stimulierten Netzhautgröße von $1,25^\circ$ sowie LED* gleicher Kondition dar. Bei diesem Vergleich der Einzelabgleichvorgänge unterscheidet sich hinsichtlich Halogen* der 1. Versuchsdurchgang signifikant von Wiederholung 2 und 4 ($p\leq 0,05$) und bei LED* der 3. Versuchsdurchgang von den verbleibenden ebenfalls signifikant ($p\leq 0,05$). Eine Erklärung für die gefundenen Fälle lässt sich nicht finden. Da die Richtungsvorgabe zwischen ober- und unter-schweligen Einstellungen geändert wurde, ist auch diesbezüglich keine Ursachenerklärung festzustellen. Aufgrund der Menge an getätigten Abgleichen ist ein statistischer Fehler zu vermuten.

Somit kann zusammengefasst werden, dass es hinsichtlich aller ausgewerteten paarweisen Vergleiche nicht zu systematischen Abweichungen innerhalb des Versuchs kam. Selbst auf die gefundenen Spezialfälle bezogen zeigen sich keine Effekte über alle jeweils (2 Spektren) zwölf (3 stimulierte Netzhautgrößen, 4 Leuchtdichteadaptationsniveaus) durchgeführten Auswertungen (je 4 Abgleiche). Eine Systematik ist diesbezüglich nicht auffindbar. Insofern sind die gefundenen Unterschiede zwischen den Abgleichwiederholungen zu vernachlässigen.

Damit auf die Reliabilität geschlossen werden kann, ist zu erörtern, wie gut die vier Abgleiche der Hellempfindung interpersonell korrelieren. Hierfür wurde eine Kreuzkorrelation der Mittelwerte jeder Variablenausprägung über die vier Einstellwiederholungen gerechnet. Es ist zu untersuchen, wie gut die Vertreter der betrachteten Stichprobe einen Mittelwert über eine Wiederholung der Einstellung reproduzieren können. Nachfolgend sind die Ergebnisse verdeutlicht (Abbildung 54). Auf eine Darstellung des Abgleichs des Testreizes Halogen* auf die gleiche Referenz wird verzichtet, da hinsichtlich des NCT's auf die Einstellgüte hingewiesen wurde.

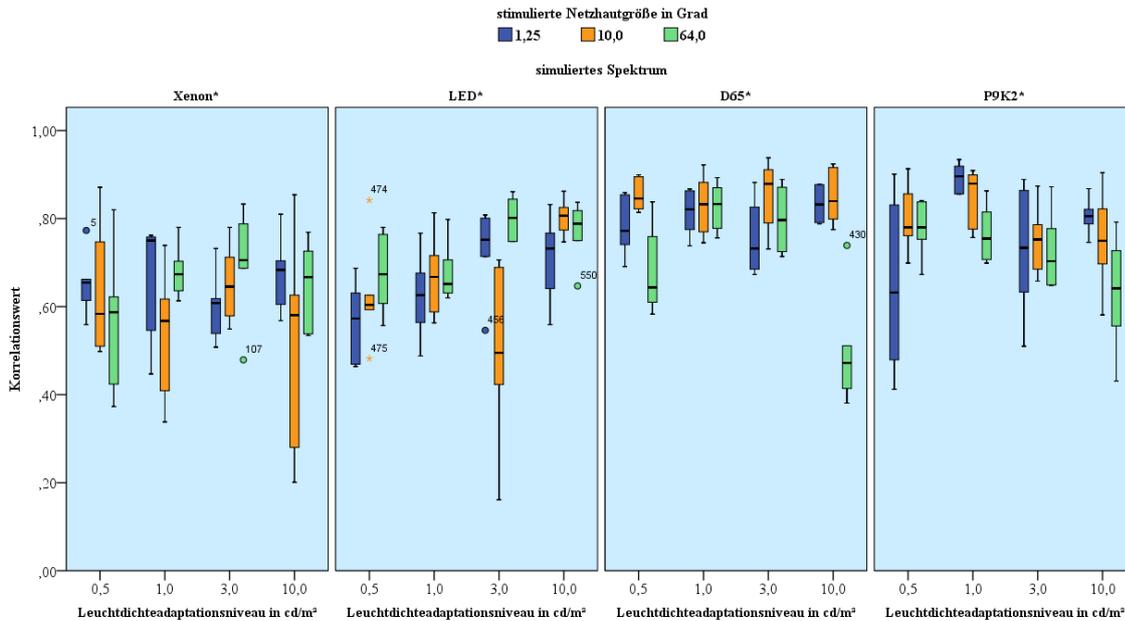


Abbildung 54: Korrelation der Abgleichwiederholungsvorgänge (nummerierte Elemente: Ausreißer; Querbalken: Median; Balken kennzeichnen oberes und unteres Quartil; schwarze Linien (Whisker) stellen letzten Wert innerhalb des 1,5-fachen Inquartilabstands dar)

Es ist ersichtlich, dass generell eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der Stichprobenmittelwerte über vier Einstellvorgänge erreicht ist. Bis auf eine Ausnahme bei D65* liegen alle Mediane über einem Korrelationswert von $r=,50$. Während kein Zusammenhang der Einstellgüte mit dem Leuchtdichteadaptationsniveau gegeben ist, zeigt sich eine Abhängigkeit hinsichtlich der spektralen Verteilung des Testreizes. Während bei Xenon* die größten Unterschiede zwischen den Einstellungen vorkommen, stellen sich die verbleibenden simulierten Spektren sehr reliabel dar. Ein ähnlicher Sachverhalt ist hinsichtlich der stimulierten Netzhautgröße vorhanden. Die Spreizung des oberen und unteren Quartils ist vornehmlich bei $\alpha=1,25^\circ$ am höchsten. Es ist zu schlussfolgern, dass es den Probanden am schwersten gefallen ist, eine Hellempfindung bei der kleinsten stimulierten Netzhautgröße wiederholt einzustellen. Dennoch überzeugt die Höhe der Korrelation über alle Einstellwiederholungen und stellt ein hohes Maß an Reliabilität dar.

Die Güte der durchgeführten Untersuchung ist anhand durchgeführter Bewertungen geprüft. Die Methode des SBBM hat sich erneut durch die geringen Abweichungen des NCT ausgezeichnet und somit als geeignet erwiesen. Weiterhin unterscheiden sich die erhobenen Abgleiche hinsichtlich ihrer Wiederholbarkeit kaum voneinander, sondern weisen eher eine hohe Korrelation auf.

9.5 Ergebnisdiskussion

Wie bereits im Einzelnen ausgeführt, treten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Altersgruppe oder des Geschlechts auf. Diesbezüglich sind keine getrennten Auswertungen der vorliegenden Daten vorzunehmen und die ermittelten Daten erhalten für die gesamte Stichprobe und für eine praktische Umsetzung Gültigkeit.

Es besteht die Hypothese, dass durch eine Verwendung neuer, defizitbefreiter spektraler Empfindlichkeitsfunktionen, welche der stimulierten Rezeptorstruktur und somit der Sehojektgröße entsprechen, die Hellempfindung keinem signifikanten Einfluss der stimulierten Netzhautgröße unterliegt. In Anbetracht der vorliegenden Auswertung ist diese Vermutung zurückzuweisen. Diesbezüglich ist festzuhalten, dass die verwendeten Empfindlichkeitsfunktionen unter photopischen Konditionen erzeugt wurden. Wird eine Grenze bei $L=10 \text{ cd/m}^2$ zwischen photopischer und mesopischer Wahrnehmung angenommen, sollte zumindest für jene Adaptationsleuchtdichte eine Verbesserung der Beschreibung mittels stimulusgrößenangepasster Beschreibungen der Bewertungssysteme II und III erfolgen. Genauer Betrachtet bedeutet dies, wenn ein Bewertungssystem bestehend aus stimulusgrößenangepassten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen unter photopischen Bedingungen vorliegt, sollte bei Gültigkeit der Annahme einer wahrnehmungsangepassten Bewertung des Hellempfindens kein signifikanter Unterschied der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse auftreten. Durch Betrachtung spektraler Empfindlichkeitsfunktionen, gewonnen über FP und DBM, sollte zumindest ein System für die zwei kleinsten stimulierten Netzhautgrößen die Hellempfindung gut abbilden und somit keinen signifikanten Unterschied aufweisen.

Im Ergebnis der neuerlichen Auswertung ergibt sich, wie vermutet, für das Bewertungssystem I ein signifikanter Unterschied des eingestellten Hellempfindens in Anlehnung an die unabhängige Variable der stimulierten Netzhautgröße ($F_{(df=1,570)}=41.093$; $p \leq .01$). Eine identische Aussage ergibt sich jedoch auch hinsichtlich der Bewertungssysteme II ($F_{(df=1,580)}=75.774$; $p \leq .01$) und III ($F_{(df=1,590)}=86.006$; $p \leq .01$), obwohl wie bereits erwähnt bei letzteren neben der Anpassung der Bewertungsfunktionen an die Stimulusgröße auch der chromatische Luminanzanteil Beachtung findet. Unwahrscheinlich ist, dass beim betrachteten Leuchtdichteadaptationsniveau ein nennenswerter mesopischer Einfluss gegeben ist. Vielmehr ist zu vermuten und mittels der in Kapitel 3.4 und 3.5 dargelegten wissenschaftlichen Quellen gestützt, dass keine der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen ein Kriterium zur Beschreibung der Hellempfindung bildet (Brightness-Luminance-Discrepancy). Mit Bewertung der vorkommenden interindividuellen Standardabweichungen, bestätigen sich die Erkenntnisse aus vorangegangenen wissenschaftlichen Studien nach der Schwierigkeit einer einheitlichen interpersonellen Auffassung. Alle Bewertungssysteme zeigen überdies eine deutliche Veränderung des Verlaufs der Hellempfindung über die retinal beleuchtete Fläche. Hierbei kann die stimulierte Netzhautgröße von $\alpha=10^\circ$ als „Umschwingpunkt“ betrachtet werden. Für eine explorative Erweiterung der aufgeführten Werte in geringere Leuchtdichteadaptationsniveaus und somit einer sinkenden Zapfen-, jedoch steigenden Stäbchenempfindlichkeit wird eine deutliche Ausprägung des PURKINJE-Effekts hinsichtlich geringerer stimulierter Retinaareale erwartet. Schlussfolgernd ist nicht nur die Rezeptorverteilung, sondern auch deren Verschaltung maßgebend für eine Hellempfindung. Eine Wichtung der Signalanteile innerhalb höherer Signalverarbeitungsebenen erscheint vor dem Hintergrund aus Kapitel 2.2 als gegeben. Die getätigte Aussage, dass Steuerungsmechanismen die Weiterverarbeitung und -leitung von Signalanteilen, eventuell auch unter Regelung konkurrierender Signalanteile einzelner Rezeptortypen je Stimulusausdehnung und -position, beeinflussen, spricht für die aufgeführten Effekte.

Einen weiteren, ggf. übertragbaren Erklärungsansatz bietet die Theorie eines positiven Rückkopplungskanals, basierend auf der Verschaltung von Zapfen mit den übergeordneten Horizontalzellen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es neben der lateralen Inhibition auch einen exhibitatorischen Einfluss (Boost-Effect) gibt, welcher räumlich ausgedehnt weit über das erregte Netzhautareal hinaus wirkt, also auch umliegende Rezeptoren beeinflusst. [vgl. JACKMAN 2011 ET AL.]

Hinsichtlich der Grenze, die das mesopische Sehen nach oben beschränkt, lässt sich keine eindeutige Annahme formulieren. Da von sich einander bedingenden Signalverarbeitungsprozessen in Abhängigkeit von der stimulierten Netzhautgröße ausgegangen werden muss, ist weder die in der Literatur geäußerte Größe von $L=3 \text{ cd/m}^2$ noch eine Leuchtdichte von 10 cd/m^2 eindeutig zu empfehlen. Daraus resultierend wird für weitere Annahmen die $L=10 \text{ cd/m}^2$ als Grenze betrachtet. In Bezug auf die Gesamteffektstärken der vorliegenden Bewertungssysteme ergibt sich ein $\eta_I^2=.61$ für die $V(\lambda)$ -basierten Werte und eine fast gleiche Effektstärke von $\eta_{II}^2=.57$ zu $\eta_{III}^2=.55$. Anders formuliert gilt es, bei den verwendeten Bewertungssystemen II und III eine geringere Varianz aufzuklären, da durch die benannten Charakteristika eine besser angepasste Hellempfindung erfolgt. Eine differenzierte Ausprägung der Effektstärken ist diesem Kapitel zu entnehmen.

Anhand dargelegter Ergebnisse und Auswertungen ist klar ersichtlich, dass für eine Einschätzung der Hellempfindung im mesopischen Bereich nicht nur die spektrale Verteilung, das Leuchtdichteadaptationsniveau und die stimulierte Netzhautgröße einen signifikanten Einfluss haben, sondern auch die verwendeten Bewertungssysteme sowie deren Charakteristika in deren Entstehung zu berücksichtigen sind. Eine allgemeingültige Aussage für ein zukünftig zu verwendendes Bewertungssystem kann vor dem genannten Hintergrund nicht getroffen werden. Diesbezüglich ist auf die jeweilige zu erhebende Größe und deren beeinflussende Variablen im Besonderen einzugehen. Eine mesopische Spektrenbewertung zur Hellempfindung unter Verwendung der photopischen Empfindlichkeitsfunktionen ist weiterhin nur über psychophysikalische Versuche oder existente mesopische Modelle möglich.

Neben den dargelegten Ergebnissen stellen die erhobenen Daten eine Berechnungsgrundlage bestehender ergänzender Systeme der Photometrie dar. Auf der einen Seite können die bestehenden Systeme aufgrund ihrer Genauigkeit für die Beschreibung vorliegender Daten genutzt werden und, wenn entsprechende Kriterien erfüllt sind, als weiterführende Berechnungsgrundlage für mesopische Verhältnisse Empfehlung finden. In Kapitel 4.1.2 ist auf unterschiedliche Modelle eingegangen worden. Entsprechend der Vielzahl an existenten Ansätzen wurde deren Menge für eine folgende Auswertung drastisch reduziert. Die Wahl eines „mesopischen Modells“ für das $1,25^\circ$ Sehfeld stellte sich als trivial dar, da nur das NAKANO-System den geforderten Ansprüchen gerecht wird. Für die Stimulusgröße von $\alpha=10^\circ$ existieren weitaus mehr Modellierungen. Zur Erstellung der in der CIE 141 aufgeführten Systeme wurde das HCBM (DBM) genutzt und somit auch der chromatische Luminanzkanal abgebildet. Eine Modellierung, welche den photopischen Anteil nur mit $V(\lambda)$ abbildet, erscheint nicht flexibel genug, um die komplexen Zusammenhänge eines mesopischen Hellempfindens zu erfassen. Aus den verbleibenden zwei 4-Komponentensystemen, welche am ehesten die Rezeptorstruktur und deren Verarbeitungsvorgänge des Menschen versinnbildlichen, wurde das KOKOSCHKA-BODMANN-System gewählt. Ausschlaggebend für diese Entscheidung waren die Ergebnisse des CIE 141 Workshop-Tests, wobei das System nach TREZONA innerhalb der relevanten mesopischen Bedingungen höhere Restfehlerwerte erreichte.

Die Basis für die Berechnung bildet, äquivalent zu den Berechnungsvorschriften aus der CIE 141, das Bewertungssystem I, ergänzt um die benötigten Eingangsdaten. Anhand der vorliegenden spektralen Abgleichdaten lässt sich beispielsweise relativ unkompliziert auf benötigte 10° -basierte Werte schließen. Auf diesen Daten beruhend wurde für jede untersuchte Kondition des

Hauptversuchs die mittlere äquivalente Leuchtdichte bestimmt, daraus folgend die systemäquivalente Leuchtdichte (L_{seq}) berechnet und im Verhältnis zur ebenfalls berechneten Halogen*-Referenz ($L_{seq,ref}$) betrachtet (vgl. Gl. 19). Die sich daraus ergebenden systemäquivalenten Leuchtdichteverhältnisse $V_{seq,\%}$ sollten keine prozentuale Abweichung von Null ergeben. Ist dies der Fall, liegt eine sehr gute Beschreibung der empirisch erhobenen äquivalenten Leuchtdichten, ergo auch der Hellempfindung, vor (Abbildung 55).

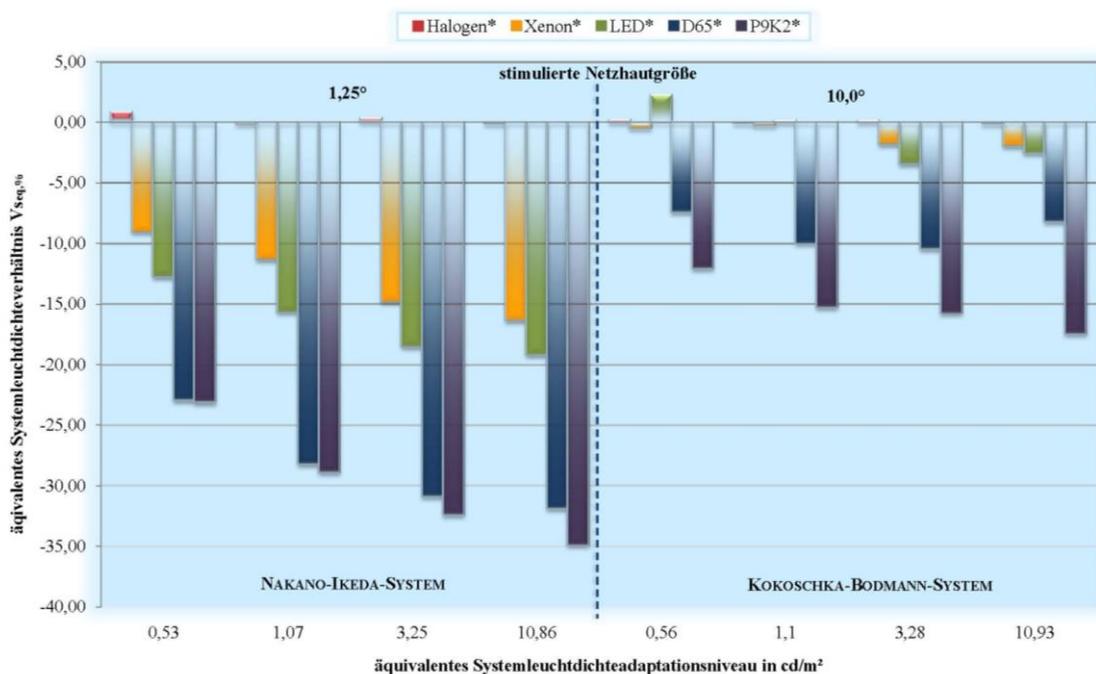


Abbildung 55: Gegenüberstellung ergänzender Systeme der Photometrie anhand empirischer Daten aus Abgleich der mesopischen Hellempfindung

Für die NAKANO-Werte bei $1,25^\circ$ stellt sich eine geringfügige Veränderung der systemäquivalenten Leuchtdichteverhältnisse zu einer photopischen Bewertung ein. Der prognostizierte Ausgleich empirisch erhobener Werte findet nicht statt. Die erheblichen Abweichungen und somit das „Versagen“ des angewandten Systems ließe sich ggf. auf eine geringe oder auch auszuschließende Stäbchenbeteiligung innerhalb des betrachteten retinalen Areal von $1,25^\circ$ statt 2° zurückführen, da das NAKANO-System beide Rezeptorarten in eine Berechnung der mesopischen Leuchtdichte einbezieht. Durch Separierung der Werte bei $L_{seq,ref}=10,86 \text{ cd/m}^2$ ($L=10 \text{ cd/m}^2$), einer Leuchtdichte, bei welcher rein photopisches Sehen angenommen werden kann, hätte ein Ausgleich der Werte stattfinden müssen, zumal der Anspruch des NAKANO-Systems besteht, neben dem mesopischen auch den verbleibenden Bereich des photopischen Sehens abzubilden. Eine Korrektur chromatischer Effekte erfolgt jedoch scheinbar nur unzureichend. Etwas besser erfüllt das KOKOSCHKA-BODMANN-System einer ergänzenden Photometrie die gestellte Aufgabe. Deutlich ist eine kompensierende Wirkung der vormals dargestellten empirisch erhobenen, äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse zu erkennen. Somit geht das aufgestellte Modell verstärkt auf vorkommende Nichtlinearitäten und Interaktionen im mesopischen Bereich ein. Entgegengesetzt zu den Erwartungen erfüllen jedoch beide Systeme nicht die gewünschte korrekte Abbildung einer mesopischen Hellempfindung. Auch wenn das angewandte 4-Komponentensystem eine bessere Annäherung an eine wahrnehmungsorientierte Helligkeitsbeschreibung gibt, sind gerade bei kurzweilig dominanten Spektren die Abweichungen von $V_{seq,\%}$ noch zu groß und bewegen sich je nach Leuchtdichteadaptationsniveau zwischen 10 und 20 %. Hinzuzuziehen ist der Aufwand einer solchen Berechnung im Gegensatz zu einer rein photopischen Bewertung. Gründe sind sicherlich in den schon genannten Punkten aus Kapitel 4.1.2 zu finden. Neben der Betrachtung von nicht-breitbandigen, eher hy-

pothetischen Spektren spielen die niedrige Probandenmenge und ggf. die von FOTIOS und Kollegen aufgegriffenen Effekte der verwendeten Methode eine Rolle. Dies ist jedoch in erster Linie als spekulativ anzusehen, da kein Zugriff auf die Rohdaten jener Modellentstehung erfolgte. Während durch die Internationale Beleuchtungskommission ein sehleistungsorientiertes mesopisches Modell empfohlen wurde, steht dies für das Kriterium der Hellempfindung noch aus [CIE 191, 2010]. Aus Untersuchungen, eine mesopische Hellempfindung zu erheben und anschließend die Güte mesopischer Berechnungsmodelle zu prüfen, geht hervor, dass kein Modell in allen Belangen besonders gut mit empirischen Werten korreliert (vgl. KÖHLER 2006; BODROGI ET AL. 2009).

Bezüglich einer der Hellempfindung zukommenden außerordentlichen Bedeutung für das mesopische Sehen stellt sich die Forderung nach einer konzentrierten Forschungsarbeit. Ein weiterführender Ansatz wird in den folgenden Abschnitten aufgezeigt und einer Modellierung unterzogen. Hierfür können neben den Eingangsdaten der in dieser Arbeit durchgeführten Evaluation zusätzlich jene aus Studien mit vergleichbarem Forschungshintergrund herangezogen werden. Diese sind im Vorfeld auf Plausibilität zu prüfen. Die in Betracht kommenden Studien rekrutieren sich aus den in Kapitel 4.1.3 genannten. Stichprobenhaft werden äquivalente Leuchtdichteverhältnisse ähnlicher Untersuchungskonditionen den eigenen Ergebnissen gegenübergestellt. Zeigen sich geringe Abweichungen von den im Haupttest mittels Bezugssystem I ermittelten Werten, ist dies variablenbedingt und eine Datenübernahme ist möglich. In folgender Tabelle sind die relevanten $V_{eq, \%}$ zusammengefasst.

Studie	Sehzeichen- größe	Leuchtdichte- adaptationsniveau	Referenz (CCT)	Testspektrum (CCT)	$V_{eq, \%}$
GOTTSCHALK 2007 & KLEY ET AL. 2007	2*10°	1,00 cd/m ²	Halogen (2900 K)	HID (3300 K)	-5,60 %
		1,02 cd/m ²		LED (5500 K)	-17,83 %
GOTTSCHALK 2007	2*18°	1,00 cd/m ²	Halogen (2900 K)	HID (3300 K)	-13,82 %
		1,02 cd/m ²		LED (5500 K)	-22,82 %
KHANH ET AL. 2008	2*12,5°	0,50 cd/m ²	Halogen (2800 K)	HID (4850 K)	-6,90 %
				LED (6550 K)	-12,30 %
BODROGI ET AL. 2010	2*15,4°	0,50 cd/m ²	Halogen (3160 K)	HID (3960 K)	-7,00 %
				LED (7860 K)	-15,00 %

Tabelle 21: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse verwandter wissenschaftlicher Studien (vgl. auch mit Tabelle 7)³⁵

Bezüglich der in Tabelle 21 aufgeführten äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse wird ersichtlich, dass selbst bei sich ähnelnden Versuchskonditionen starke Unterschiede in den Werten von $V_{eq, \%}$ bestehen. Auch studienübergreifende Tendenzen der Hellempfindung bei ähnlicher Stimulusprägung lassen sich kaum erkennen.

Durch den Vergleich der resultierenden Werte aus den Studien von KHANH und Kollegen (2008) mit jenen von BODROGI ET AL. (2010), mit annähernd gleicher Sehzeichengröße, wäre zu vermuten gewesen, dass $V_{eq, \%}$ in erstgenannter Untersuchung weit größer ist. Trotz des größeren Unterschiedes zwischen Referenz und HID zeigt sich gegenüber der später erhobenen Studie nur ein $\Delta V_{eq, \%} = -0,1 \%$. Zweifellos ist jedoch mit höherer, ähnlichster Farbtemperatur auch ein größerer kurzweiliger Anteil zu erwarten, ergo eine höhere Hellempfindung. Ein dieses ausgleichender Ein-

³⁵ Die in KLEY ET AL. (2007) hinterlegten Werte der Referenzleuchtdichte und die äquivalenten Leuchtdichte des Teststimulus entsprechen den Werten aus GOTTSCHALK (2007), unter der Sehzeichengröße $2\alpha=18^\circ$. Die aufgeführten $V_{eq, \%}$ stimmen jedoch wieder überein.

fluss, der aus der erhöhten Sehzeichengröße resultiert, kann jedoch ausgeschlossen werden. Unter Hinzunahme der aufgeführten Werte aus Tabelle 21 (Zeile 1 & 3) zu den Daten aus Bewertungssystem I (Tabelle 29), ergibt sich ein widersprüchliches Bild. Trotz der ähnlichen Sehfeldgrößen für einen Abgleich und einer Bewertung mit $V(\lambda)$ bei einer stimulierten Netzhautgröße von 10° stellen sich die angesprochenen Werte ähnlicher Spektren als weitaus höher dar, als dies aus den eigenen Untersuchungen hervorgeht. Beispielsweise betragen die mittels SBBM gewonnenen $V_{eq,\%}$ -Werte bei $L_{ad}=0,5 \text{ cd/m}^2$ für Xenon* $-3,53 \%$ und $-4,31 \%$ für LED*. Diese liegen weit unter den Ergebnissen vergleichbarer Untersuchungen (Tabelle 21, Zeile 1 & 3). Bei Betrachtung des äquivalenten Leuchtdichteverhältnisses bei D65* mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6210 K und $V_{eq,\%}-17,94 \%$, wird ersichtlich, dass die Farbtemperatur ein höchst ungenauer Indikator für eine Vorhersage des Hellempfindens ist (Tabelle 21, Zeile 3, LED). Zu einer ähnlichen Einschätzung kommt auch FOTIOS, welcher eine Korrelation eines eingestellten Beleuchtungsstärkeverhältnisses als Maß der Hellempfindung zum CCT-Verhältnis ($r^2=.25$) untersuchte. Der Zusammenfassung ist zu entnehmen, dass „neither CCT, CRI, Gamut Area nor chromaticity alone make good predictions of brightness response.“ [vgl. FOTIOS 2001A]

Die Vermutung, dass eine Erhöhung der Sehzeichengröße auch eine Erhöhung des Unterschiedes zwischen Referenz und gleich hell eingestelltem Testreiz bedingt, wie dies aus den beiden ersten Untersuchungen der Tabelle 21 hervorgeht, ist in Anbetracht der vorliegenden Ergebnisse des Maintests über alle Bewertungssysteme zurückzuweisen. Bei der Betrachtung von vergleichbaren Abgleichergebnissen bestehender Studien zu dieser Arbeit lassen sich einzig unter Verwendung des Bewertungssystems III ($V_{B10}(\lambda)$) annähernd gleiche Werte aufzeigen. Für die kleinsten zwei Adaptationsleuchtdichten bei $L_{ad}=0,5$ und $1,0 \text{ cd/m}^2$ ist das äquivalente Leuchtdichteverhältnis für Xenon* ca. $-6,19 \%$.

Die studierten wissenschaftlichen Untersuchungen betrachtend, ergeben sich weitere Effekte, welche sich im Vergleich zu den vorliegenden Ergebnissen verschieden darstellen. Bei Betrachtung aller Adaptationsleuchtdichten der ersten beiden Untersuchungen aus Tabelle 21 erschließt sich ein Verlauf, bei welchem die äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse bei $L_{ad}=0,1 \text{ cd/m}^2$ zuerst positiv sind, die Teststimuli also wider Erwarten heller eingestellt wurden, als die Halogen-Referenz. Beim verbleibenden Adaptationsniveau von $L_{ad}=5,0 \text{ cd/m}^2$ ergibt sich eine kontinuierliche negative Zunahme von $V_{eq,\%}$ je Spektrum bis zu $-25,44 \%$ (LED) und $-13,47 \%$ (HID) bzw. bei einer Testfeldgröße $\alpha=18^\circ$ von $-29,88 \%$ (LED) und $-19,53 \%$ (HID) [KLEY ET AL. 2007; GOTTSCHALK 2007].

Hinsichtlich der Untersuchung von KHANH ET AL. (2008) ergibt sich für die genannten spektralen Verteilungen, bei $L=0,1 \text{ cd/m}^2$ beginnend, eine Abnahme von $V_{eq,\%}$ in Richtung Nullachse (kein Unterschied). Dem folgt ein Umkehrpunkt bei $L_{ad}=0,5 \text{ cd/m}^2$ und anschließend eine Zunahme der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse bis zu $L_{ad}=1,5 \text{ cd/m}^2$. Die großen Differenzen von Test- und Referenzstimuli ließen sich mit einer Zunahme des Stäbchenanteils ab dem mittleren betrachteten Adaptationsniveau sowie mit einer Zunahme des chromatischen Anteils für die photopische Richtung begründen. Es scheint allerdings unwahrscheinlich für den Fall des nicht aufgeführten Spektrums von Xenon bei einer ähnlichsten Farbtemperatur von 3800 K. Kennzeichnend dafür ist eine beständige Zunahme der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse, ausgehend von $-3,7\%$ ($L_{ad}=1,5 \text{ cd/m}^2$) bis zu $-8,9 \%$ des niedrigsten Adaptationsniveaus ($L_{ad}=0,1 \text{ cd/m}^2$). Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich bei BODROGI ET AL. (2010).

Alle beschriebenen Aspekte decken sich nicht mit den in dieser Arbeit bestimmten Werten und Tendenzen, speziell unter Bewertungssystem I und $\alpha=10^\circ$ sowie weiterführend für $\alpha=64^\circ$, wenn

bei der verwendeten DBM herangezogener Untersuchungen die gesamte stimulierte Netzhautgröße Betrachtung findet (Test- und Referenzfeld). Daraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Es herrschen starke Unterschiede in den angewendeten Methoden der SBBM und DBM, welche sich wider Erwarten auf die Ergebnisse des Hellempfindens betreffend, auswirken. Dies ist in der aufgeführten wissenschaftlichen Literatur in Kapitel 4.1.2 nicht angegeben.
- Bei den dargelegten, mittels DBM durchgeführten, Untersuchungen, liegen starke Einflussfaktoren vor, welche keinen Ausgleich im Versuchsdesign fanden, somit die Ergebnisse beeinflusst haben könnten (vgl. Kapitel 3.5 & 4.2.1). Ein NCT liegt nicht vor.
- Die Versuchsvariablen der Einzeluntersuchungen stellen sich als zu unterschiedlich dar und lassen keine Vergleichbarkeit aller Daten zu.
- Die ermittelten Werte fließen aufgrund der zu großen Unterschiede nicht in eine weiterführende mathematische Beschreibung der in dieser Arbeit erhobenen Hellempfindungen ein.

Hinsichtlich einer Gesamtaussage zu den Ergebnissen des Haupttests und der damit verbundenen weiteren Forschungsarbeit lässt sich Folgendes identifizieren:

- Eine photopische Bewertung, selbst mit wahrnehmungspsychologisch angepassten spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen (Methode, stimulierte Netzhautgröße, Berücksichtigung spektraler Anteile), ist kein probates Mittel zur Quantifizierung einer mesopischen Hellempfindung. Dies kann nur über die Hilfsgröße einer äquivalenten Leuchtdichte für speziell zu betrachtende Fälle gelten.
- Es ergeben sich gravierende Unterschiede innerhalb der Hellempfindung hinsichtlich der Beachtung eines chromatischen Anteils. Wie damit zukünftig umzugehen ist, bleibt festzulegen.
- Eine Anwendung des 2° Normalbeobachters ist, vor dem Hintergrund der erhaltenen Ergebnisse und hinsichtlich der stimulierten Netzhautgröße, unzureichend.
- Gegenwärtig existierende mesopische Systeme erfüllen nicht den Anspruch einer Vorhersage mesopischer äquivalenter Leuchtdichten, wie sie durch diverse empirische Versuche ermittelt wurden. Daraus resultierend sollte vorerst der Ansatz bestehen, speziellere Modellierungen durchzuführen, was den Anspruch einer allgemeinen Mächtigkeit ebensolcher Beschreibungssysteme einschränkt, jedoch zu einer erhöhten Genauigkeit führt.
- Der Ansatz eines 4-Komponentenmodells erweist sich vor dem dargelegten theoretischen Hintergrund sowie der Komplexität des visuellen Systems als angebracht. In Folge jener in der wissenschaftlichen Literatur vorliegenden spektralen Empfindlichkeitskurven der Rezeptoren ist ein Versuch zu unternehmen, eine rezeptorbasierte Modellierung unter Berücksichtigung untersuchter Variablen durchzuführen.

KAPITEL 10

MODELLENTWICKLUNG ZUR BESCHREIBUNG DER MESOPISCHEN HELLEMPFINDUNG

Zielsetzung dieses Kapitels ist die Erstellung einer mathematischen Beschreibung der in den vorangegangenen Kapiteln evaluierten Hellempfindungen. Als Ergebnis soll ein anwendbares Modell entstehen. Zusätzlich zu den betrachteten Parametern besteht die Maßgabe einer erweiterten Anwendbarkeit auf beliebige Parametervariationen innerhalb der aufgeführten Modellgrenzen. Ein berechnetes äquivalentes Leuchtdichteverhältnis stellt die Kennzahl einer mesopischen Hellempfindung dar.

In einem ersten Schritt sind Anforderungen an eine modellhafte Beschreibung festzulegen und Erweiterungen gegenüber bestehenden Modellen aufzuführen. Durch die Verfügbarkeit spektraler Rezeptorempfindlichkeitsfunktionen findet eine Orientierung an vier voneinander unabhängig agierenden Komponenten statt, welche in Form einer gewichteten Linearkombination Verwendung finden.

Für die Modellaufstellung sind zwei hauptsächliche Schritte relevant. Im ersten Schritt werden die empirischen Daten aufbereitet und für die Nutzung des GAUß'schen Eliminationsverfahrens optimiert. Eine Berechnung von spezifischen Wichtungsfaktoren je stimulierter Netzhautgröße findet in Form von Matrizenoperatoren statt. Daraus ableitend lassen sich drei Berechnungsvorschriften für das jeweilig stimulierte Netzhautareal aufstellen.

Das Gesamtmodell zeichnet sich durch die Eigenschaft aus, die drei betrachteten Dimensionen Spektrum, Leuchtdichteadaptationsniveau und stimulierte Netzhautgröße in eine Gesamtgleichung einzubeziehen. Somit besteht die Notwendigkeit der Durchführung einer multiplen Regression.

Schließlich ist in Abschnitt 10.3 die Modellvalidierung mittels RMSE-Werten und der Validierungsprozedur der CIE 141 aufgeführt.

10.1 Prämissen der modellhaften Beschreibung

Für die Aufbereitung der empirisch ermittelten Daten zu einem praktisch anwendbaren Berechnungsmodell der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse und folgend der Möglichkeit einer Einschätzung der mesopischen Hellempfindung sind Einschränkungen und Festlegungen zu treffen, welche die Berechnungsvorschrift in der Praxis anwendbar, jedoch auch in hohem Maße wissenschaftlich valide gestalten.

Zunächst gilt es, Eingangsgrößen für die Modellerstellung und künftige Berechnung aufzubereiten. Durch die Verwendung radiometrischer Daten ergibt sich die Möglichkeit einer Abkehr von bisherigen Verfahrensweisen und deren Problematiken. Wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt, stellt weder eine $V(\lambda)$ -basierte noch eine Bewertung mittels den Systemen II und III eine zu empfehlende Vorgehensweise dar. Seit dem Jahr 2000 liegen spektrale Rezeptorempfindlichkeitsfunktionen der Zapfen vor, welche in Kombination mit der skotopischen Empfindlichkeitsfunktion die vorkommenden retinalen Rezeptoren und deren Eigenschaften abbilden [vgl. STOCKMAN ET AL. 2000, 1999].

In Anhang – Kapitel 10 (S. 205) sind die spektralen Empfindlichkeiten zu Abbildung 56 tabellarisch aufgeführt.

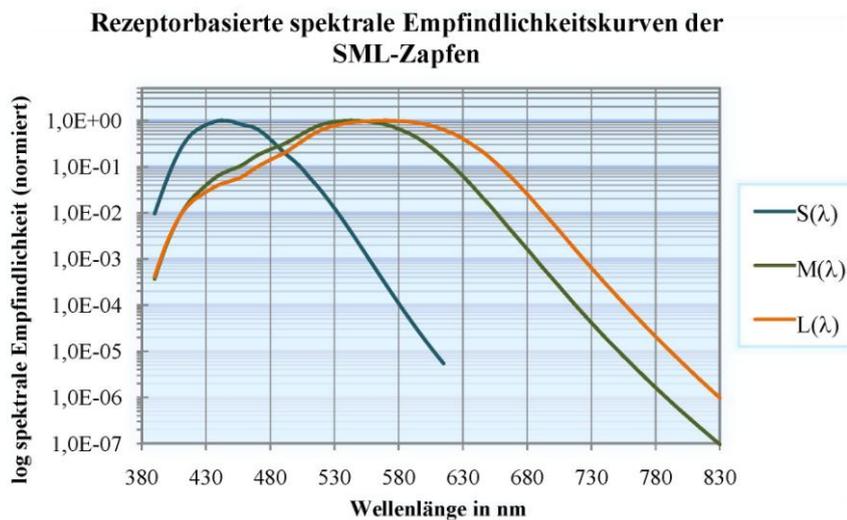


Abbildung 56: Empfindlichkeitskurven SML-Zapfen (normiert) (vgl. Tabelle 28)

Eine Verwendung dieser „Cone Fundamentals“ bietet entscheidende Vorteile. Hauptsächlich ist zu nennen, dass die zu Grunde gelegten Colour Matching Functions (CMFs) von STILES ET AL. (1959) direkt gemessen sind. Diese unterliegen keinen unnötigen photometrischen Annahmen, wie die vergleichbaren CIE-Normspektralwertfunktionen, und beschreiben das retinale Rezeptorverhalten direkt. Somit ist eine rezeptorbasierte Beschreibung der mesopischen Hellempfindung möglich, welche in weiteren Betrachtungsschritten auch einer Veränderung der stimulierten Netzhautgröße gerecht wird und keinen Limitationen auf einen Sehwinkel von $\alpha_{max}=10^\circ$ unterworfen ist. Weiterhin bleibt zu erwarten, dass mit dem Rückgriff auf den Ursprung der betrachteten Empfindung eine sehr gute Aussage zu den angesprochenen dynamischen Wahrnehmungsprozessen im Auge, bedingt durch die Rezeptorinteraktion im mesopischen Anwendungsbereich, erreicht wird. Insofern bildet ein 4-Komponentenmodell, die vier Rezeptortypen (SMLV') betrachtend, den Ausgangspunkt der Modellierung. Gestützt wird der geannte Ansatz durch die schon vorgestellte Dreikomponententheorie sowie durch Forschungsansätze die besagen, dass sich die drei Zapfenempfänger unter mesopischen Bedingungen eventuell differenziert (gegenseitig dominierend) verhalten [HOUGH ET AL. 1969].

Diese Auffassung wird durch eine mathematische Herangehensweise bestätigt. Von einer durchgeführten Faktorenanalyse ausgehend, ist ein errechneter mittlerer Fehler erst ab der dritten Gleichungskomponente (Basiszahl) akzeptabel gering. Daraus ist ableitbar, dass erst ab der dritten oder vierten linear unabhängigen Einflussgröße eine spektrale Hellempfindlichkeit abzuleiten ist. [KOKOSCHKA 1972]

Eine weitere Prämisse bildet die Kompatibilität der durch das angestrebte Modell berechneten Werte mit geltenden photometrischen Definitionen. Die Nutzung der Einheit *Candela* bildet diesbezüglich die Grundvoraussetzung. Eine Neuberechnung der zu nutzenden photometrischen Strahlungsäquivalente je spektraler Empfindlichkeitsfunktion findet vergleichend zu Kapitel 3.3 statt. Daraus resultierend kann die Leuchtdichte (äquivalent) weiterhin benutzt werden und eine Vergleichbarkeit der Daten zu vorhandenen wissenschaftlichen Studien und den gewonnenen empirischen Daten ist gewährleistet.

Die Modellgrenzen bestimmen sich aus den Festlegungen, dass eine Anwendbarkeit ausschließlich für mesopische Hellempfindungen gegeben sein soll, sowie einer Gültigkeit für zu berechnende mesopische äquivalente Leuchtdichteverhältnisse innerhalb der getroffenen Variablengrenzen (Leuchtdichte $[0,5;10 \text{ cd/m}^2]$, stimulierte Netzhautgröße $[1,25;64^\circ]$). Weiterhin soll eine Anwendung auf breitbandige spektrale Verteilungen und auf ein Bezugsspektrum, ähnlich der in dieser Arbeit verwendeten Referenz, beschränkt sein.

Hinsichtlich einer späteren Überprüfung des aufgestellten mathematischen Konstrukts sind die Aspekte einer modellinternen und einer modellexternen Validierung zu beachten. Bei Erstgenannter werden ausschließlich berechnete Werte herangezogen, welche aus den Variablen resultieren, die auch zur Modellerstellung verwendet wurden. Dies erlaubt eine Aussage über die Anpassung an sich. Bei der modellexternen Validierung werden Spektren bewertet, welche zwar empirisch untersucht wurden, jedoch nicht in die Modellerstellung einfließen. Daraus lässt sich Aufschluss über die Genauigkeit der Vorhersage mesopischer Hellempfindungen innerhalb zukünftiger Anwendungsgebiete geben.

Zusammenfassend soll das zu erstellende Modell folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Nutzung rezeptorbasierter Empfindlichkeitsfunktionen
- Erfüllung der photometrischen Definition der Basiseinheit *Candela*
- Gültigkeit nur innerhalb der Variablengrenzen und für breitbandige Spektren, keine Extrapolation
- Geringe Abweichungen der berechneten Werte zu den empirischen Werten
- Anwendbarkeit unter Betrachtung festgestellter Variablenzusammenhänge

10.2 Modellentwicklung

Die Modellentwicklung gliedert sich in zwei Phasen, welche sich jeweils einer Dimension der Einflussvariablen widmen. Zunächst wird eine Berechnung des äquivalenten Leuchtdichteverhältnisses hinsichtlich der spektralen Verteilung und des Leuchtdichteadaptationsniveaus vorgenommen. Anschließend erweitert sich dieser auf drei Gleichungen basierende Ansatz (Variable α bleibt jeweils konstant) um die Dimension der stimulierten Netzhautgröße, wodurch ein dreidimensionales Konstrukt entsteht.

Grundvoraussetzung zur Erzeugung des genannten Sachverhalts als Rezeptorbasiertes Modell ist die Überführung der eingestellten Testspektren in rezeptorbasierte Empfindlichkeiten. Entsprechendes findet durch Transformation mittels spezifischer photometrischer Strahlungsäquivalente im Sinne „rezeptorempfindlichkeitsbasierter“-Leuchtdichten statt. Eine äquivalente Vorgehensweise ist in Kapitel 3.3 beschrieben. Einer Wichtung mit den rezeptoralen Empfindlichkeitsfunktionen liegen die Stichprobenmittelwerte einer betrachteten Kondition, also eines simulierten Spektrums, einer Adaptationsleuchtdichte und einer stimulierten Netzhautgröße, zu Grunde. Ein Mittelwert je Proband und Abgleichkondition berechnet sich aus den Werten von je vier Abgleichwiederholungen. Für die weitere Datenverarbeitung sind somit 5760 (4 mal 1440) Werte zu transformieren sowie einer Mittelwertbildung zu unterziehen.

Die Transformation erfolgt analog zu Gleichung 3 mit:

$$L_{R,v} = K_{m,R} \cdot \int_{380nm}^{780nm} L_{e,\lambda} \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad \left[\frac{cd}{m^2} \right] \quad (Gl.20)$$

wobei $L_{R,v}$, einer einfachen Unterscheidbarkeit folgend, die „Rezeptor“-Leuchtdichte darstellt, $K_{m,R}$, der spektralen Empfindlichkeitsfunktion und der Definition des *Candela* folgend, das spezifische photometrische Strahlungsäquivalent und $L_{e,\lambda}$ die spektrale Strahldichte symbolisiert. $R(\lambda)$ bezeichnet die entsprechende spektrale Empfindlichkeitsfunktion des betrachteten Rezeptortyps. Die rezeptoralen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen sind $S(\lambda)$ für die kurzweilig empfindlichen Zapfen, $M(\lambda)$ für die mittelweilig und $L(\lambda)$ für die langweilig empfindlichen Zapfen.³⁶ Ergänzend steht $V'(\lambda)$ für die spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen.

Aus den vorliegenden Datensätzen lässt sich bezüglich des Abgleichkriteriums „gleiche Helligkeit“ für jedes Spektrum die vorliegende Gleichungsstruktur 21 aufstellen.

$$L_{Ref}(L_{ad}) = aL_{eq,S,v}(L_{ad}) + bL_{eq,M,v}(L_{ad}) + cL_{eq,L,v}(L_{ad}) + dL_{eq,V',v}(L_{ad}) \quad (Gl.21)$$

Hierbei ist unter $L_{Ref}(L_{ad})$ die jeweilige Adaptationsleuchtdichte zu verstehen, welche identisch mit der Referenz ist, und a, b, c, d sind die Wichtungsfaktoren der unterschiedlichen äquivalenten Leuchtdichten (auf Halogen* abgeglichen) je spektraler Rezeptorempfindlichkeit. Mittels Matrixierung lässt sich vereinfachend darstellen:

$$M = \begin{bmatrix} L_{eq,S,v,Ha}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,M,v,Ha}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,L,v,Ha}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,V',v,Ha}(L_{ad}, \alpha) \\ L_{eq,S,v,Xe}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,M,v,Xe}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,L,v,Xe}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,V',v,Xe}(L_{ad}, \alpha) \\ L_{eq,S,v,D65}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,M,v,D65}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,L,v,D65}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,V',v,D65}(L_{ad}, \alpha) \\ L_{eq,S,v,P9K2}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,M,v,P9K2}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,L,v,P9K2}(L_{ad}, \alpha) & L_{eq,V',v,P9K2}(L_{ad}, \alpha) \end{bmatrix} \quad (Gl.22)$$

$$\bar{L}_{Ref}(L_{ad}, \alpha) = M \cdot \begin{bmatrix} a(L_{ad}, \alpha) \\ b(L_{ad}, \alpha) \\ c(L_{ad}, \alpha) \\ d(L_{ad}, \alpha) \end{bmatrix}$$

wobei sich die Matrix M , in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte ($L_{ad}=(0,5;1,0;3,0;10,0 \text{ cd/m}^2)$) und der stimulierten Netzhautgröße ($\alpha=(1,25;10,0;64,0^\circ)$), aus den rezeptorbasierten äquivalenten Leuchtdichten, der Abgleiche diverser simulierter Spektren auf die Referenz-

³⁶ In der Literatur ist für die entsprechenden spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der Zapfen auch oft die Bezeichnung $\bar{s}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{l}(\lambda)$ zu finden.

leuchtdichte, in der allgemeinen Form, $L_{eq,R,v,Spektrum}(L_{ad}, \alpha)$, zusammensetzt. Weiterhin bezeichnet \bar{L}_{Ref} die zugehörige Leuchtdichte der Referenz und a, b, c, d die schon genannten zu berechnenden Wichtungsfaktoren (Gleichung 24) in bekannten Abhängigkeiten. Da das Gleichungssystem ausreichender Bestimmung unterliegt, wird auf eine Implementierung der LED*-Abgleichwerte verzichtet und diese werden für eine spätere Systemvalidierung genutzt. Mittels des GAUß'schen Eliminationsverfahrens ergeben sich die Werte für die spektralen Rezeptorwichtungen. Diese bilden den Ausgangspunkt für Phase zwei der Modellbildung.

Es stehen nun zwölf Stützstellen je stimulierter Netzhautgröße in Form der Wichtungsfunktionen der rezeptororientierten äquivalenten Leuchtdichten zur Verfügung. Mit der Zielsetzung, eine Beschreibung der Hellempfindung als äquivalentes Leuchtdichteverhältnis darzustellen sowie alle betrachteten Einflussvariablen zu berücksichtigen, geht die Durchführung einer multiplen Regression einher. Für eine Beschreibung der erhaltenen Werte, deren Interpolation und Ausgabe als Flächen der Wichtungsfaktoren a, b, c, d , wurde ein Polynom 2. Grades mit den genannten zwei Einflussvariablen gewählt. Da nur je zwölf Stützstellen für die angeführten Berechnungen zur Verfügung stehen, schließt sich eine Beschreibung der berechneten Zusammenhänge mittels höherer Polynomgrade aus. In Abbildung 57 sind die berechneten Flächen der einzelnen Wichtungsfaktoren dargestellt.

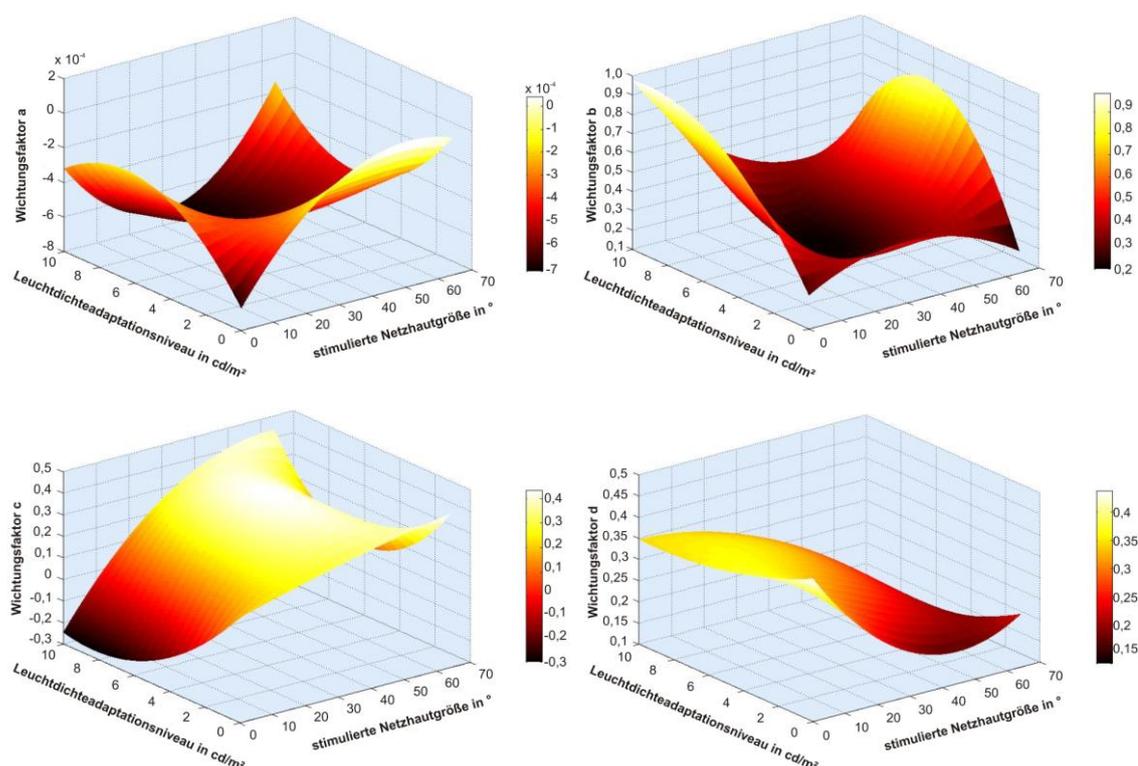


Abbildung 57: Berechnete Flächen der Wichtungsfaktoren a,b,c,d in Abhängigkeit von der Adaptionsleuchtdichte und der stimulierten Netzhautgröße

Für die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes R^2 , also der Annäherung der rechnerisch angepassten Werte ($x_{Schätzer}$) an die empirisch ermittelten Werten (x_{emp}) in Bezug auf die Gesamtvariation der betrachteten zwölf Stützstellen (i), ergeben sich nach Gleichung 23 mit $R^2_a=0,9751$, $R^2_b=0,9850$, $R^2_c=0,9992$ und $R^2_d=0,9695$ sehr gute Anpassungen. Die Stützstellen liegen an den Koordinatenpunkten der Variablen Leuchtdichte und stimulierter Netzhautgröße des jeweiligen Wichtungsfaktors a, b, c, d .

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{12} (x_{emp}(i) - x_{Schätzer}(i))^2}{\sum_{i=1}^{12} (x_{emp}(i) - \overline{x_{emp}})^2} \tag{Gl.23}$$

Hinsichtlich der aufzustellenden Polynomglieder in der allgemeinen Form ergibt sich:

$$WF = k + f_1 L_{ad} + f_2 L_{ad}^2 + f_3 \alpha + f_4 \alpha L_{ad} + f_5 \alpha L_{ad}^2 + f_6 \alpha^2 + f_7 \alpha^2 L_{ad} + f_8 \alpha^2 L_{ad}^2 \tag{Gl.24}$$

mit *WF* als jeweiligem Wichtungsfaktor (a,b,c,d) und *k* als konstantem Term. Die verbleibenden Produkte und Mischprodukte setzen sich aus den bereits bekannten Variablen zusammen.

Letztendlich ergeben sich für die entstandenen Faktoren *f*₁ bis *f*₈ der Gleichung 24 jene in Tabelle 22 aufgeführten Werte.

Konstantes Glied und Faktoren der Polynomglieder	Wichtungsfaktor			
	a	b	c	d
k	-6,723·10 ⁻⁴	2,738·10 ⁻¹	-1,878·10 ⁻¹	4,369·10 ⁻¹
f ₁	1,553·10 ⁻⁴	1,567·10 ⁻¹	-1,1·10 ⁻¹	-2,035·10 ⁻²
f ₂	-1,203·10 ⁻⁵	-8,645·10 ⁻³	6,639·10 ⁻³	1,128·10 ⁻³
f ₃	2,799·10 ⁻⁵	9,892·10 ⁻³	4,341·10 ⁻³	-1,174·10 ⁻²
f ₄	-1,342·10 ⁻⁵	-1,756·10 ⁻²	1,012·10 ⁻²	3,543·10 ⁻³
f ₅	7,898·10 ⁻⁷	1,414·10 ⁻³	-8,378·10 ⁻⁴	-2,38·10 ⁻⁴
f ₆	-2,75·10 ⁻⁷	-1,693·10 ⁻⁴	-1,263·10 ⁻⁵	1,318·10 ⁻⁴
f ₇	1,32·10 ⁻⁷	2,984·10 ⁻⁴	-1,641·10 ⁻⁴	-5,641·10 ⁻⁵
f ₈	-5,754·10 ⁻⁹	-2,584·10 ⁻⁵	1,479·10 ⁻⁶	3,839·10 ⁻⁶
Bestimmtheitsmaß R²	0,9751	0,9850	0,9992	0,9695

Tabelle 22: Übersicht der Wichtungsfaktoren und deren Polynomglieder des rezeptorbasierten Modells einer mesopischen Hellempfindung sowie des Bestimmtheitsmaßes

Mit Hilfe der bisherigen Schritte lässt sich die Berechnung des äquivalenten Leuchtdichteverhältnisses und somit der mesopischen Hellempfindung anhand der Abbildung 58 verdeutlichen.

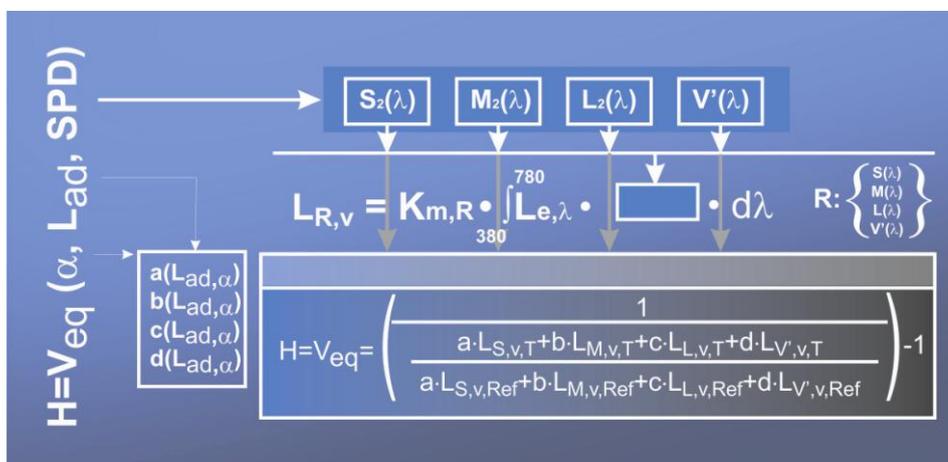


Abbildung 58: Berechnungsanweisung zur Ermittlung einer rezeptorbasierten mesopischen Hellempfindung über ein äquivalentes Leuchtdichteverhältnis

Dementsprechend soll die Größe H als Kennzahl der Hellempfindung gelten, welche identisch mit einem äquivalenten Leuchtdichteverhältnis V_{eq} ist. Es liegen Abhängigkeiten bezüglich der stimulierten Netzhautgröße α , des Leuchtdichteadaptationsniveaus L_{ad} und der spektralen Verteilung SPD (spectral power distribution) vor. Entsprechend der Gleichung 20 erfolgt im ersten Schritt eine Verrechnung der spektralen Verteilung mit den aufgeführten rezeptororientierten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen $SMLV'(\lambda)$ unter Beachtung von deren Spezifika. Im Ergebnis steht jeweils eine rezeptorbasierte Leuchtdichte $L_{R,v}$, welche sowohl für die Testlichtquelle als auch für die Referenzlichtquelle (Halogen*) berechnet wird. In erster Annäherung kann für $L_{R,v,Ref}$ auch die gemessene photopische Leuchtdichte genutzt werden. Im zweiten Schritt erfolgt die Berechnung der Wichtungsfaktoren (WF) a,b,c,d in den Abhängigkeiten zu α und L_{ad} . Diese bilden die Grundlage für den letzten Schritt, die Berechnung von V_{eq} als Maßzahl der untersuchten Hellempfindung. Die berechneten rezeptoralen Leuchtdichten des Nenners stellen im aufgeführten Term die Referenz (*Ref*) dar und ergeben den Bezugswert. Im Zähler befinden sich die hinzuzuziehenden Werte der zu testenden spektralen Verteilung, gekennzeichnet mit dem Index T . Durch Multiplikation mit dem Faktor 100 lässt sich aus V_{eq} der prozentuale Unterschied in der mesopischen Hellempfindung ermitteln ($V_{eq,\%}$) und somit in ein vergleichbares Maß zu den empirisch erhobenen Daten umwandeln.

10.3 Modellvalidierung nach CIE 141 und Kennwertberechnung

Für eine Modellvalidierung ist ein geeignetes Verfahren anzuwenden, um die Vorhersagegenauigkeit der berechneten Werte zu den empirischen Daten zu bewerten. Ein entsprechendes Vorgehen ist bereits im angesprochenen Technical Report 91 der CIE 141 beschrieben (vgl. Kapitel 4.1.2). Auch innerhalb dieses Kapitels wird ein zweistufiges Verfahren favorisiert. Zuerst wird das erstellte Modell anhand der Daten überprüft, welche auch zur Systemerzeugung herangezogen wurden. Stellen sich hinreichend gute Übereinstimmungen heraus, erfolgt eine Berechnung der Vorhersagewerte mittels externer Daten hinsichtlich der erfolgten Modellerzeugung. Der externe Datensatz setzt sich aus den empirischen Abgleichen des LED* Spektrums zusammen.

Ausgehend von zu erstellenden Hellempfindungsabgleichpaaren, bestehend aus einer äquivalenten Leuchtdichte des Teststimulus zur Referenz, erfolgt die Berechnung des Restfehlers (residual error) σ_E . Wird ein mesopisches Hellempfinden korrekt beschrieben, besteht kein Unterschied zwischen der äquivalenten Leuchtdichte des Testsignals und der Referenz und daraus resultierend auch σ_E . Die Berechnung des genannten Sachverhaltes erfolgt analog zum RMSE (Root Mean Squared Error) mit der Formel (Gl. 25).

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{L_{eq,v,Test,i}} - L_{eq,v,Ref,i})^2}{n-1}} \quad (Gl.25)$$

Zu beachten ist, dass $\overline{L_{eq,v,Test,i}}$ den Mittelwert aller erfolgten Probandenabgleiche des Testspektrums auf die Referenz der Probanden symbolisiert. Hinsichtlich einer neuen Definition zur Berechnung des Restfehlers wird für den Stichprobenumfang $n-1$ genutzt, statt n . Dies ergibt einen leicht größeren Wert für σ_E , korrigiert jedoch die Tendenz, die Unsicherheit bei kleinen Stichproben zu unterschätzen [vgl. TAYLOR 1988].

Entsprechend den Eingabegrößen wurde zuerst für jede Kondition eine systemäquivalente Leuchtdichte $\overline{L_{eq,v,Test,i}}$ nach beschriebenem Algorithmus (Abbildung 58) und den empirischen Abgleichen berechnet. Bildet also die vorgenommene Modellierung die mittels der empirischen Eingangsdaten berechneten systemäquivalenten Leuchtdichten gleich dem Abgleichkriterium „gleich hell“ auf die Referenz ab, ist dies aus einem resultierenden Restfehlerwert gleich Null ersichtlich. Ergo beschreibt das mathematische Modell die empirisch ermittelte Größe korrekt. Ausschlaggebend für diesen Rechenschritt ist somit nur die Betrachtung der rezeptororientierten äquivalenten Leuchtdichten und deren Wichtungsfaktoren. Für den Wertestichprobenumfang n bestehen je nach Validierungskriterium unterschiedliche Ansätze. Bei der Betrachtung der Restfehler, hinsichtlich der einzelnen simulierten Spektren je Abgleichkondition, ist $n=12$ (vier Leuchtdichteadaptationsniveaus und drei stimulierte Netzhautgrößen). Bezüglich des Ansatzes eines Gesamtrestfehlers für die systeminterne Prüfung und systemexterne Validierung ist $n=48$ (4 simulierte Spektren) bzw. $n=12$ (LED*). Die einzelnen Restfehlerwerte je simulierter spektraler Verteilung sind der Tabelle 33 (Anhang – Kapitel 10) zu entnehmen. Neben σ_E sind auch die berechneten äquivalenten Leuchtdichten, basierend auf den rezeptoralen Einzelanteilen, vermerkt. Kernanliegen ist es jedoch, die Validierung des Gesamtsystems durchzuführen. Dabei ergibt sich für die systeminterne Prüfung ein $\sigma_{E,intern}=0,0169$ und für die externen Werte, das LED*-Spektrum betreffend, ein $\sigma_{E,extern}=0,1035$. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass das aufgestellte Berechnungsmodell auf alle Spektren innerhalb der geschilderten Systemgültigkeit anwendbar ist (Kapitel 10.1). Ein berechnetes äquivalentes Leuchtdichteverhältnis ist mit geringen Abweichungen identisch zu einer Hellempfindung des Menschen und somit als berechenbare Größe in verschiedenen Anwendungen einsetzbar.

10.4 Diskussion der Ergebnisse

Es wurde durch wissenschaftliche Arbeiten belegt, dass einige gebräuchliche photometrische Größen wie die CCT, das S/P-Verhältnis, etc. nur bedingt gute Prediktoren für eine Modellierung der mesopischen Hellempfindung darstellen. Diese Thematik ist v. a. vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit herangezogenen Bewertungssysteme besonders zu betrachten. Ausgehend von den empirischen Daten existiert die Möglichkeit, bestehende rezeptorbasierte, spektrale Empfindlichkeitsfunktionen heranzuziehen, um auf der Grundlage der Reizentstehung in der Retina eine Modellierung durchzuführen. Die Realisierung stützt sich auf die Nutzung der 2° Zapfenempfindlichkeitsfunktionen (ZEF). Von einer Veränderung der Sensibilität betrachteter Rezeptoren über die Netzhautposition wird nicht ausgegangen. Der Einfluss des Makulapigments ist durch Verwendung der 2°-ZEF für größere stimulierte Netzhautgrößen vernachlässigt. Insgesamt werden relevante Ausprägungen hinsichtlich der Sehobjektgröße und mesopischer Leuchtdichten behandelt.

Wie schon in den Grundlagen dieser Arbeit angesprochen, ist der mesopische Bereich durch dynamische Veränderungen in Abhängigkeit von der Adaptation geprägt. Für eine Beschreibung der Hellempfindung muss somit der jeweiligen Rezeptorinteraktion entsprochen werden. Durch die Verwendung der besagten vier Modelleingangsrößen, in Form der spektralen Rezeptorempfindlichkeiten ist einer Abbildung der besagten Interaktionsvorgänge grundsätzlich entsprochen. In der Modellierung sind diese separaten Eingangsgrößen mit variablen Wichtungsfaktoren versehen, um auf die Hellempfindung je Adaptationszustand und Reiz eingehen zu können und somit die Vorgänge im Auge abbildbar zu gestalten. Aus den mehrdimensionalen Zusammenhängen im Auge resultieren die Wichtungsfaktoren und drücken die Interaktionsanteile der Re-

zeptoren bei bestimmten Reizen in Abhängigkeit der stimulierten Netzhautgröße (Rezeptorverteilung) und der Adaptationsleuchtdichte aus. In deren Ergänzung zur Beschreibung der Hellempfindung geht der spektrabhängige Bezug mit dem Test-Referenz-Verhältnis, aufgeschlüsselt nach den jeweiligen rezeptorbasierten Leuchtdichten, ein. Insofern geben die Wichtungsfaktoren die Interaktionsanteile der einzelnen Rezeptoren (Adaptation, perzeptive Felder, Signalverarbeitung) wieder und dienen als Ausgleichsfaktoren für das zu lösende Gleichungssystem. Die rezeptorbasierten Leuchtdichten hingegen spiegeln den spektralen Reizeinfluss auf die Zapfen und Stäbchen wider.

Anhand der modellbehafteten äquivalenten Leuchtdichten der empirisch erfassten Teststimuli lässt sich insgesamt eine hohe Genauigkeit des Modells ableiten. Eine hinreichend zuverlässige Vorhersage einer systemäquivalenten Leuchtdichte sowie deren Verhältnis zur Referenz ist möglich (vgl. Tabelle 36, Anhang – Kapitel 10). Die besagten Differenzen nehmen insbesondere mit Steigerung der Chromatizität bezüglich der Referenz zu und könnten durch das Einbringen weiterer Stützstellen eine Minimierung erfahren.

Ausgehend von den vorgestellten Leuchtdichtegrenzen einer mesopischen Wahrnehmung ist eine absolute Abstinenz der Stäbchen bei $L=10 \text{ cd/m}^2$ und den dieser Arbeit vorliegenden Forschungsvariablen unwahrscheinlich. Ähnliches gilt für die stimulierte Netzhautgröße von $1,25^\circ$. Ein zweifelsfreier Beleg für eine Stäbchenfreiheit besagter retinaler Zone kann über die zitierten Forschungsberichte und insbesondere über die dort aufgeführten intraindividuellen Varianzen nicht als erbracht angesehen werden. Des Weiteren ist ein Einfluss von Streulicht, bedingt durch den verwendeten Forschungsaufbau, nicht gänzlich auszuschließen. Diesen Fakten folgend fand bei der Modellerstellung immer eine Betrachtung aller zur Verfügung stehender Komponenten statt. Der Einfluss der Stäbchen unter besagten Bedingungen wird jedoch als gering angesehen und ist bei folgenden Untersuchungen mittels zusätzlicher Randbedingungen genauer zu erforschen und in das vorliegende Modell einzubinden.

Aus den dargestellten CIE 141-Ergebnissen lässt sich eine Einschätzung der Modellgüte zu bereits existierenden Modellierungen unternehmen. Auch hier liegen Restfehlerwerte bezüglich modellerzeugungsexterner Daten vor, welche je Beleuchtungsstärkeadaptationsniveau mit empirisch ermittelten Daten verglichen wurden. Eine Einordnung des $\sigma_{E, \text{extern}}$ -Wertes dieser Arbeit zeigt, dass sich mit vorliegenden Variablenausprägungen der Restfehlerwert des externen LED*-Spektrums als geringer oder zumindest vergleichbar darstellen lässt. Dies ist nicht zuletzt dem begrenzten Untersuchungsbereich und somit der nicht angestrebten Allgemeingültigkeit über weite photometrische Bereiche zuzuschreiben.

In Anbetracht der getätigten Aussage ist zu bedenken, dass zur Validierung und Überprüfung des vorliegenden rezeptorbasierten Modells zur Beschreibung einer mesopischen Hellempfindung nur ein modellierungsexterner Datensatz zur Verfügung stand. Der Gesamtwert des Restfehlers verdeutlicht somit eine Abweichung von den Zielwerten über nur ein simuliertes Spektrum, dafür aber über vier mesopische Leuchtdichteadaptationsniveaus und drei stimulierte Netzhautgrößen. Etwas anders zeigt sich die Zusammensetzung der in Abbildung 59 aufgeführten Restfehlerwerte, welche sich aus sieben Teststimuli, bezogen auf eine Stimulusgröße und ein Adaptationsniveau, zusammensetzen. Für eine genauere Diskussion des genannten Sachverhaltes sind noch folgende Untersuchungen weiterer Stützstellen zu vollziehen. Als Synergieeffekt ergibt sich eine weitere Modellanpassung. Eine Verbesserung der Genauigkeit ist zu erwarten.

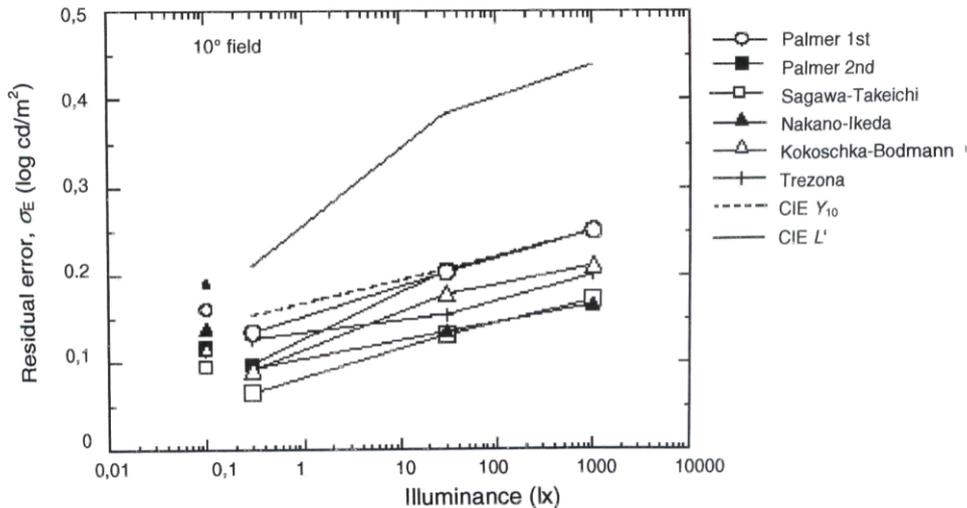


Abbildung 59: Restfehlerdarstellung der CIE 91 Workshop Data einzelner ergänzender Systeme der Photometrie (Y_{10} : entspricht der Leuchtdichte von $V_{10}(\lambda)$) [CIE 141]³⁷

Durch das vorliegende Modell ist erstmals ein Ansatz zur rezeptorbasierten Interpretation einer mesopischen Hellempfindung unternommen worden. Zu keinem Zeitpunkt herrschte der Anspruch, eine modellhafte Beschreibung über alle photometrischen Adaptationszustände zu realisieren. Vielmehr bestand die Forderung nach einer Eingrenzung relevanter Bereiche und einer Untersuchung und Beschreibung dieser hinsichtlich breitbandiger spektraler Verteilungen über verschiedene Reizausdehnungen auf der Retina. Eben jener Forschungsansatz wurde auf verschiedenen Wegen zu erreichen versucht und fand einen akzeptablen Algorithmus unter Nutzung der spektralen Zapfenempfindlichkeitsfunktionen. Eine Vorhersage rezeptorsystembasierter äquivalenter Leuchtdichten und Leuchtdichteverhältnisse, bezogen auf die Referenz einer breitbandigen Halogenverteilung, ist möglich. Eine Gültigkeit hinsichtlich anderer Referenzen wird vermutet, kann zum derzeitigen Stand der Forschungsarbeit jedoch nicht empirisch belegt werden. Der Grundsatz einer Gültigkeit des Transitivitätsprinzips wurde nicht überprüft und ist bestenfalls qualitativ möglich, jedoch bis zur Verfügbarkeit genauerer Daten eher zu vermeiden.

³⁷ Die Bezeichnung der Ordinatenachse kann zu einigen Irritationen führen. Angegeben ist der Restfehler σ_E , welcher auf den berechneten äquivalenten Leuchtdichten der einzelnen Systeme beruht, bezogen auf die dargestellten Beleuchtungsstärken einer Adaptation auf die Referenz.

KAPITEL 11

DOMINANZVERHALTEN VISUELLER KANÄLE

Eine weitere Erhöhung des Komplexitätsgrades einer Beschreibung der Hellempfindung im mesopischen Bereich ist durch das Vorkommen eines bisher nur wenig beachteten Dominanzverhaltens visueller Kanäle gegeben. Wie schon im Kapitel 2, insbesondere im Abschnitt „Prinzipien des Sehvorgangs“, aufgeführt, kann es unter bestimmten Bedingungen zu einem Konkurrenzverhalten in der Signalverarbeitung kommen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit ist eher von einem Dominanzverhalten zu sprechen, welches sich bisher in zwei Zustandsformen unterteilen lässt. Hierbei weisen Personen mit achromatischer Dominanz ein Hellempfinden ähnlich der $V(\lambda)$ -Funktion auf; jene mit chromatischer Dominanz kennzeichnen sich durch einen erhöhten chromatischen Anteil im Luminanzkanal. Je nachdem welches Dominanzverhalten bei einer Person auftritt, hat dies Einfluss auf die Hellempfindung. Eine Berücksichtigung dieses Umstands hinsichtlich einer zu bestimmenden mesopischen Hellempfindung soll erfolgen.

Um den Effekt des Dominanzverhaltens zu verdeutlichen, ist gesondert zu formulieren, dass bei chromatisch dominanten Personen eine Hellempfindung mit Variation des Spektrums, jedoch gleicher Referenz, stärker ausgeprägt ist, als dies bei Vertretern mit achromatischer Dominanz der Fall ist. Insbesondere beim Vergleich von in dieser Arbeit nicht betrachteten schmalbandigen Spektralreizen mit spektral breitbandigen Referenzen ist von einem noch stärkeren Einfluss auf ein zu ermittelndes Hellempfinden auszugehen als beim Vergleich vorliegender Stimuli. Auswirkungen auf generierte Gesamtmodelle zur Beschreibung von Hellempfindungen sind unter den genannten Aspekten zukünftig zu untersuchen.

Das vorliegende Kapitel widmet sich eingehend dem aufgeführten Spezialfall und zeigt neben einer Methode der Probandenclustering Möglichkeiten auf, ein entsprechendes Dominanzverhalten zu bestimmen. Auswirkungen der chromatischen oder achromatischen Dominanz auf die vorliegenden Arbeitsergebnisse werden berücksichtigt und diskutiert. Diese resultieren in je einem weiteren, der Dominanzausprägung entsprechenden Modellierungsansatz.

11.1 Theoretischer Hintergrund und Darstellung der Problematik

Generell wird in der Lichttechnik von einer einheitlichen Beschreibung der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion über alle Menschen ausgegangen. Hierbei ist es gleichgültig, welcher Erhebungsmethode diese unterliegt, oder welche demographischen Faktoren zum Tragen kommen. Je nach Einflussfaktoren existiert eine spezielle Beschreibungsform, welche durch die typischen interindividuellen Varianzen geprägt ist.

Ausgehend von den bisher veröffentlichten wissenschaftlichen Arbeiten fand ein erster Ansatz von IKEDA und Kollegen hinsichtlich der Spezifikation individueller Variationen der Hellempfindlichkeit statt. Ziel war es, individuelle Diskrepanzen aufzuzeigen und eine Vorhersage der jeweiligen personengeprägten spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen anhand von zwei wellenlängenbasierten Eingangsgrößen zu treffen. Als Datengrundlage dienten die in der CIE 75 veröffentlichten Untersuchungen der spektralen Hellempfindlichkeit für 2° und 10° basierte heterochromatische Direktvergleiche. Aus einer anschließenden Komponentenanalyse wurden vier Hauptkomponenten je Stimulusgröße berechnet. Die 1. Hauptkomponente beschreibt den Beitrag der „Farbigkeit“ zur Helligkeit. Ist dieser groß, bilden sich zwei Maxima auf beiden Seiten der Referenz bei einer Wellenlänge von 570 nm heraus. Invers dazu stellt sich der Funktionsverlauf bei einem negativen Wert der 1. Komponente dar (Abbildung 60). Die 2. Hauptkomponente bezieht sich auf die Eigenschaft des Probanden, kurzweilige (Komponente > 0) oder langweilige (Komponente < 0) Spektralanteile mit einer höheren Empfindlichkeit zu wichten. Jene verbleibenden Komponenten spezifizieren die Eigenschaft des Beobachters zur Nutzung der M- und L-Zapfen für das Hellempfinden. Ein Vergleich der kumulierten Beiträge aller Hauptkomponenten zeigte, dass bereits die ersten beiden Hauptkomponenten für die betrachteten Stimulusgrößen über 70 % dazu beitragen, die individuellen Variation in der Beurteilung der spektralen Empfindlichkeit wieder zu geben. Für eine folgende modellhafte Beschreibung des Sachverhalts konnten die Eingangsgrößen auf die ersten beiden Eigenvektoren beschränkt werden, um eine ausreichende Güte der Modellierung zu erreichen. In einem folgenden Schritt wurden Abweichungsindices in Abhängigkeit von den Hauptkomponenten berechnet. Hierbei griffen IKEDA und Kollegen auf die interindividuellen spektralen Standardabweichungen für die 2° und 10° Probandenversuche der CIE 75 und die spektralen Eigenvektoren der 1. und 2. Hauptkomponente zurück. Die berechneten Abweichungsindices A und B sind in Abbildung 61 für alle Probanden dargestellt und beschreiben im erweiterten Sinn die Ausprägung der Hauptkomponenten sowie die damit verbundenen Effekte auf die spektrale Empfindlichkeit. Der Ursprungspunkt symbolisiert die jeweilige spektrale Empfindlichkeit nach $V_{b,2}(\lambda)$ und $V_{b,10}(\lambda)$. [vgl. IKEDA ET AL. 1992]

Äußerst interessant ist der Sachverhalt der dargelegten Probandenergebnisse hinsichtlich der erfolgten Komponentenanalyse und der sich daraus ergebenden spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen $V_{B2,individuell}(\lambda)$ und $V_{B10,individuell}(\lambda)$. Hinsichtlich der gemittelten $V_{B2}(\lambda)$ - und $V_{B10}(\lambda)$ -Funktion lassen sich diverse Abweichungen erkennen. Auch wenn die Verläufe der zu vergleichenden spektralen Empfindlichkeitsfunktionen interindividuell stark differieren, lassen sich grundsätzlich zwei Typen identifizieren. Jene achromatisch dominanten Typen, welche sich durch ein Kurvenmaximum auszeichnen und sonst dem Verlauf einer $V(\lambda)$ -Kurve stark ähneln, und jene verbleibendem chromatischem Typus. Dieser zeichnet sich zumindest durch ein zweites Maximum im Kurvenverlauf aus und unterscheidet sich mitunter stark im qualitativen Kurvenverlauf zur jeweiligen $V_B(\lambda)$ -Funktion. Entsprechender Sachverhalt ist in Abbildung 60 visualisiert.

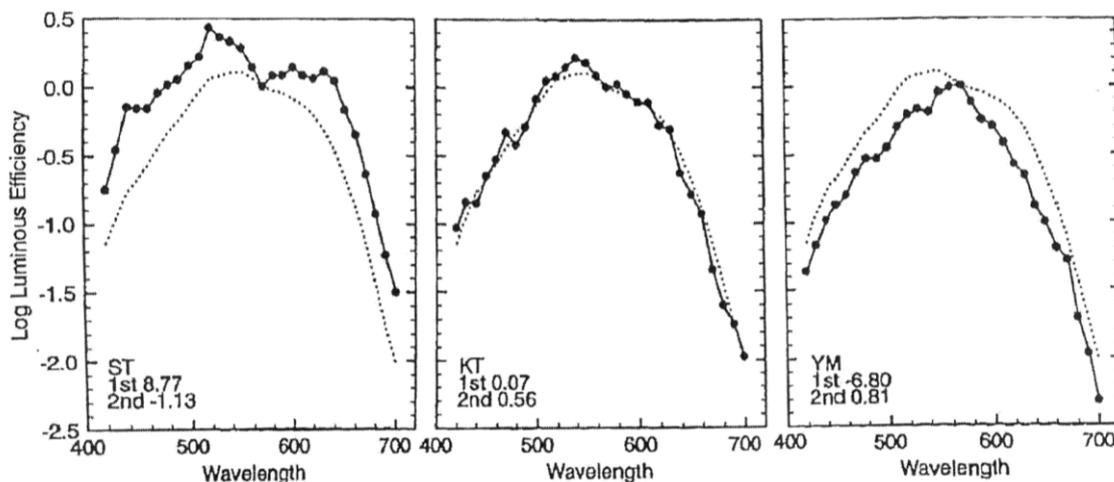


Abbildung 60: Darstellung dominanzbehafteter Unterschiede eines 10° Beobachters (links: chromatisch dominanter Typ; mitte: neutraler Typ hinsichtlich der Methode HCBM; rechts: achromatisch dominanter Typ; gepunktete Linie $V_{B10}(\lambda)$; durchgezogene Linie: individuelle Helmpfindlichkeitsfunktion basierend auf der Komponentenanalyse) [vgl. IKEDA ET AL. 1992]

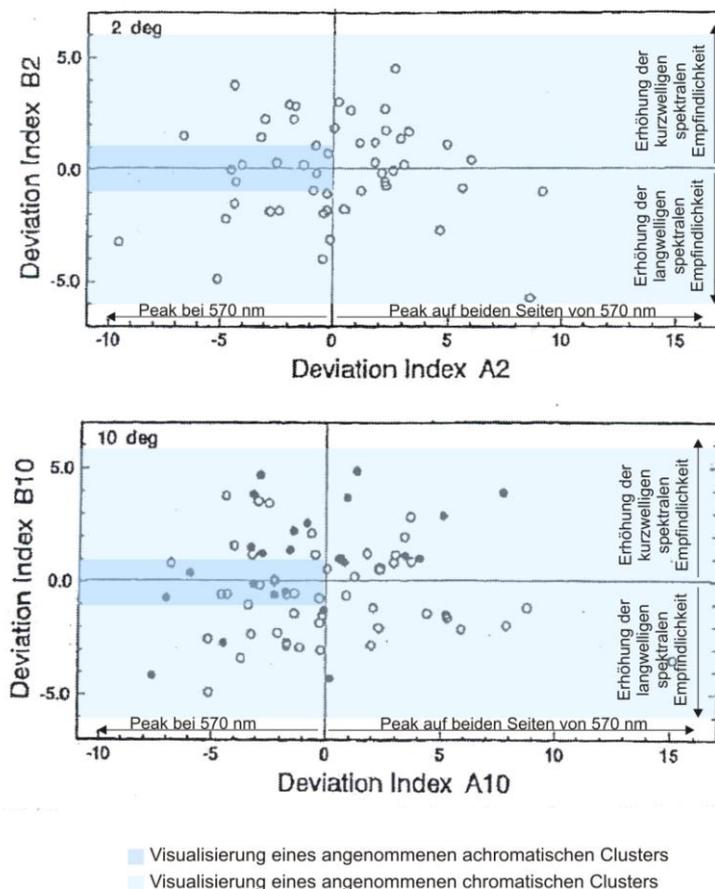


Abbildung 61: Interpretation der Probandenvariation hinsichtlich der Abweichungsindizes A und B je Sehzeichengröße (gefüllte Kreise: Daten PALMER (1985)) [mod. vgl. IKEDA ET AL. 1992]

Bei näherer Betrachtung zeigt sich eine deutliche Mehrheit der Vertreter des chromatisch dominanten Typs, wobei die Annahme des achromatischen Clusters unter der Prämisse des Vorhandenseins von nur einem Peak (Maximum) und einer nicht zu starken Abweichung der spektralen Empfindlichkeit von $V_{B2;10}(\lambda)$ erfolgt. Ausgehend von der vorliegenden Verteilung lassen sich

jedoch keine eindeutigen Gruppeneinteilungen vornehmen, wie dies durch PALMER 1985³⁸ angedeutet wird [vgl. IKEDA ET AL. 1992]. IKEDA und Forschungskollegen teilen die gefundenen Variationen in vier koordinatenachsenbestimmte Ausprägungen ein. Daraus resultiert, wie schon angedeutet, eine erste Dominanzausprägung. Wandert der Abweichungsindexwert A in den negativen Bereich, entsteht ein Empfindlichkeitsmaximum bei $\lambda_{\max}=570$ nm. Ist zudem kaum eine Veränderung des Index B auf der Ordinate gegeben, spricht dies für eine achromatische Zuordnung der Versuchsperson. Die Abszisse gibt somit Aufschluss über die Anzahl der sich herausgebildeten spektralen Empfindlichkeitsmaxima, wohingegen die Ordinate die Erhöhung der jeweiligen spektralen Empfindlichkeit in Bezug auf die Referenz ($V_{B2;10}(\lambda)$) angibt.

YAGUCHI ET AL. (1993) erweitern bereits aufgeführte Ergebnisse durch eigenständige Untersuchungen und eine erneute Modellbildung mittels Komponentenanalyse anhand der schon dargelegten Wellenlängen. Die herausragende Leistung innerhalb dieser Forschungsarbeit ist die Gegenüberstellung von 16 spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen, erhoben durch die Methoden der FP und HCBM. Wie bereits aus Kapitel 3.5 bekannt, wird bei einem Helligkeitsabgleich zweier Stimuli, unter Nutzung der Methode der Flimmerphotometrie, nur der achromatische Kanal angesprochen. Anders verhält es sich unter Nutzung der Direktvergleichsmethode, bei welcher auch der chromatische Beitrag Einfluss auf den Helligkeitsabgleich hat. Dementsprechend ist zu folgern, dass bei keinem oder nur sehr kleinem Unterschied zwischen beiden Methoden eine achromatische Dominanz vorliegt, bei einem größeren Unterschied eine chromatische Dominanz. Der entsprechende Sachverhalt lässt sich an folgenden Beispielen aufzeigen (Abbildung 62).

Aus der getätigten Komponentenanalyse ist zwar eine entsprechende Dominanzinterpretation durchzuführen, jedoch nur mit Kenntnis über die Abweichung der eingestellten Hellempfindung beider Methoden anhand der bereits genannten Wellenlängen.

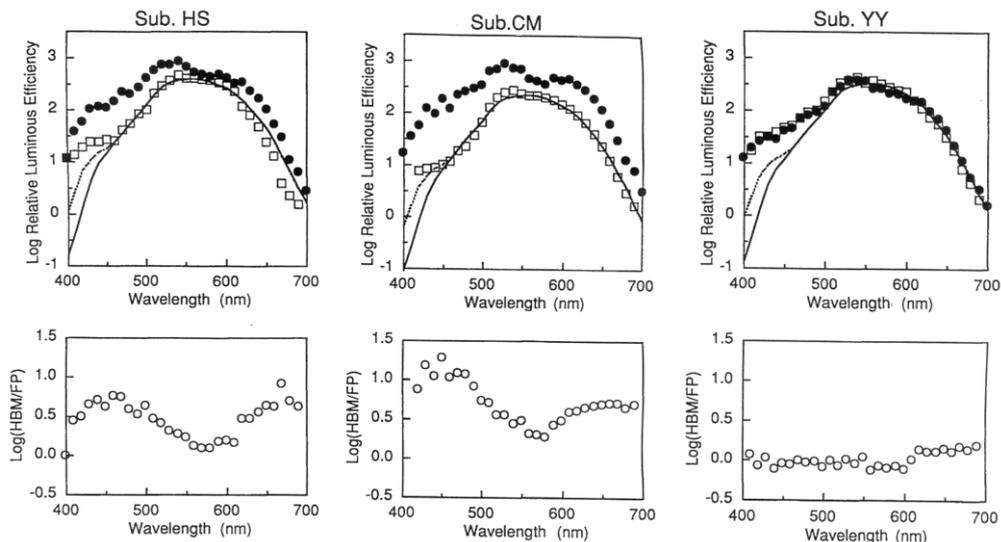


Abbildung 62: Unterschiede der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion in Abhängigkeit der Erhebungsmethode als Kriterium zur Einordnung visueller Dominanztypen (Subjekt HS&CM: chromatisch dominant; Subjekt YY: achromatisch dominant; gefüllte Kreise: HCBM; offene Quadrate: FP; durchgezogene Linie: $V(\lambda)$; gestrichelte Linie: $V_M(\lambda)$; offene Kreise: methodenbasierte Unterschiede) [YAGUCHI ET AL. 1993]

³⁸ Typ 1: gleicht der CIE $y_{10}(\lambda)$ -Normspektralwertkurve

Typ 2: zeigt zwei Kurvenmaxima auf

Typ 3: gleicht CIE $y_{10}(\lambda)$ -Normspektralwertkurve, zeigt allerdings einen deutlich breiteren Kurvenverlauf

Einen vergleichbaren Ansatz unternehmen MINODA ET AL. (2007). Sein Team und er stellten gleichfalls eine Methodengegenüberstellung von Abgleichen zwischen FP und HCBM auf. Die betrachteten Stützstellen für die Abgleichsdifferenzen ergaben sich aus fünf Wellenlängen, das gesamte visuelle Spektrum abbildend. Auch wenn sich die Ergebnisse beider genannter Untersuchungen gleichen, ist festzustellen, dass speziell in den Randbereichen des betrachteten Spektrums die größten Differenzen auftreten. Ausgehend von den in dieser Arbeit betrachteten breitbandigen Spektren und bezüglich der Verwendung kurzwellig dominanter spektraler Verteilungen gewinnt der dargestellte Fakt stark an Bedeutung. Personen des chromatisch dominanten Typs haben eine sehr viel höhere spektrale Empfindlichkeit bei kurzweiliger Strahlungseinwirkung, als die Personen des verbleibenden Typs. Ist eine Verschiebung der maximalen spektralen Empfindlichkeit zum kurzweiligen Ende der Lichtstrahlung gegeben, wie es unter der Adpatation auf mesopische Wahrnehmungsbedingen der Fall ist, kann durchaus eine Verstärkung des genannten Effekts erfolgen.

Potentielle Auswirkungen ergeben sich in zwei Richtungen. Derzeit werden lichttechnische Normungen und messtechnische Beurteilungen ausgehend von einer achromatischen Dominanz durchgeführt. Im Sinne einer Beurteilung des Hellempfindens werden insbesondere jedoch kurzweilig dominante Spektren mittels chromatischer Dominanz heller empfunden, als dies mittels achromatischer Prägung geschieht. Speziell im Fall der psychologischen Blendung können chromatisch dominante Personen benachteiligt sein. Dem entgegengesetzt steht das Konstrukt, welches sich durch Anpassung der Leuchtdichte an das Hellempfinden im mesopischen Bereich ergibt. Würden die deutlich höheren Werte eines V_{eq} genutzt, um auf Basis der ermittelten Hellempfindung der chromatisch dominanten Gruppe die Leuchtdichtewerte, beispielweise in der Fahrzeugvorfeldbeleuchtung, zu senken, ergäbe sich daraus ein Nachteil für die achromatisch geprägten Fahrzeugführer. Dadurch, dass für jene Gruppe keine Empfindlichkeiten in der entsprechenden Ausprägung vorhanden sind, würde das nach gerade genannten Kriterien gesenkte Licht weniger hell wirken, als für die Chromaten. Daraus können sich Nachteile hinsichtlich einer Wahrnehmungsleistung ergeben.

11.2 Dominanzcluster

In Bezug auf die im letzten Kapitel beleuchtete Problematik ergibt sich die Notwendigkeit, speziell bei der Betrachtung von Hellempfindungen Cluster hinsichtlich einer entsprechenden Dominanz zu identifizieren. Anschließend kann eine Prüfung des Variableneinflusses erfolgen.

In einem ersten Ansatz mit mesopischem Hintergrund fand eine Clusterbildung bei BODROGI und Kollegen Anwendung. Es erfolgten Abgleiche der Hellempfindung mittels Direktvergleichsmethode und diese wurden in systemäquivalente Leuchtdichten des SAGAWA-Systems (2006) überführt. Als Ausgangsdaten zur Clusterung dienten die mittleren äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse eines Probanden über alle Abgleichkonditionen. Mit der Annahme, dass das angewandte System korrekte Transformationen der Abgleichdaten vornimmt, stellen große Abweichungen der empirischen zu den berechneten Daten besondere Einflussfaktoren der chromatischen Komponente dar. Die Grenzen für eine Zuordnung ergeben sich aus dem Mittelwert der Einzelverhältnisse zwischen der photopischen Referenzleuchtdichte und der berechneten „mesopischen“ Referenzleuchtdichte. Dies ist nach persönlichen Aussagen BODROGI's jedoch eine grobe Einschätzung und soll eher als Anhaltspunkt dienen. Eine erfolgte Differenzierung der 18 Probanden ergibt eine annähernde Gleichverteilung. Oft ist eine Gruppenzuteilung jedoch nicht eindeutig. [vgl. BODROGI ET AL. 2009]

Für die in dieser Arbeit erhobenen Daten wird eine andere Vorgehensweise gewählt. Wie aus Kapitel 11.1 ersichtlich, resultieren unterschiedliche interindividuelle Hellempfindungen, basierend auf der Hypothese der Dominanzcluster, aus einer differenzierten Ausprägung der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion. Hinsichtlich der Achromaten müsste sich eine Baseline herausbilden, bei der, unabhängig von der spektralen Verteilung eines Adaptationslevels, vergleichbare Abgleiche identischer Hellempfindung durch den Probanden eingestellt werden. Nur mit sehr starker chromatischer Komponente, abweichend vom Referenzspektrum, ist ein Versatz von der individuellen Baseline zu erwarten. Bezogen auf das Cluster der Chromaten ist eher mit einer stetigen Folge, im Sinne einer steigenden chromatischen Komponente des Luminanzkanals, zu rechnen. Zur Clusterbildung wird nicht auf die Verfahrensweise nach BODROGI und Kollegen (2009) zurückgegriffen, sondern eine zweistufige Clusteranalyse herangezogen.

Zuerst erfolgt eine hierarchische Clusteranalyse nach WARD³⁹, wobei jene Daten fusioniert werden, welche die Varianz innerhalb des jeweiligen Clusters in möglichst geringem Maße ansteigen lassen. Anschließend wird die nun vorgegebene Clusterung durch ein nicht hierarchisch-iteratives Verfahren mittels Clusterschwerpunkten optimiert. Dies erfolgt durch ein Verschieben der Probanden innerhalb einer vorgegebenen Clusterausprägung. [BACKHAUS ET AL. 2000]

Eine Unterteilung in drei Dominanztypen brachte keine signifikante Verbesserung, weshalb nur zwischen chromatischen und achromatischen Typen unterschieden wurde. Nach drei Iterationsschritten umfasst das Stichprobencluster der achromatischen Dominanz 15 Probanden und der chromatischen Dominanz neun Probanden. Bezogen auf eine durchgeführte Zwischensubjektanalyse der empirischen Daten aller Bewertungssysteme stellt sich jeweils ein hochsignifikanter Einfluss der Dominanzausprägung auf das Hellempfinden ein ($p < .01$). Eine Betrachtung der Interaktionseffekte mit den verbleibenden Zwischensubjektfaktoren stellt sich als nicht signifikant heraus.

11.3 Auswirkungen der Dominanz auf das Hellempfinden

Bei Anwendung der generierten Dominanzcluster auf die vorliegenden empirischen Daten lassen sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der Hellempfindung und damit der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse aufzeigen. Dargestellt sind die $V(\lambda)$ -basierten äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse für die Achromaten in Abbildung 63 und die Chromaten in Abbildung 64. Die genauen Werte sind der Aufstellung des Anhangs (S. 214 ff) zu entnehmen.

Deutlich ist eine Reduktion von $V_{eq,\%}$, bezüglich einer achromatischen Dominanz in Richtung der Nullachse über fast alle Abgleichkonditionen zu erkennen. Während bei der kleinsten stimulierten Netzhautgröße nur ein deutlicher Abfall der Werteausprägung über alle simulierten Spektren zu verzeichnen ist, ist bei $\alpha=10^\circ$ eine zusätzliche Veränderung festzustellen. Diese äußert sich darin, dass bei den zwei geringsten Leuchtdichteadaptationsniveaus kaum ein Unterschied der $V_{eq,\%}$ und damit der Hellempfindung vorhanden ist. Hier hat sich bereits eine interindividuelle Achromaten-Baseline herausgebildet. Erst bei einem deutlich größeren Einfluss der chromatischen Luminanzkomponente nimmt ein Unterschied in der Hellempfindung zu. Spektren gleicher Lichtfarbe werden somit durch achromatisch dominante Personen annähernd gleich

³⁹ Agglomeratives Verfahren: Startpunkt bildet die jeweils kleinste Partitionierung. D.h. jedes Element bildet anfangs eine eigenständige Gruppe, wobei jene Elemente mit der kleinsten euklidischen Distanz in weiteren Schritten zusammengefasst werden. [vgl. BACKHAUS ET AL. 2000]

bewertet. Deutlich ist dies bei der Betrachtung der größten stimulierten Netzhautgröße zu sehen, bei welcher eine annähernde Gleichbeurteilung der Hellempfindung zwischen Halogen*, Xenon* und LED* über alle betrachteten Leuchtdichteadaptationsniveaus nachgewiesen ist. Ein PURKINJE-Effekt ist unter diesen Bedingungen nur schwerlich zu erkennen und bestenfalls zu vermuten. Bezogen auf das chromatische Cluster ist eine Reihenfolge in der Zunahme der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse mit ebenfalls zunehmenden kurzwelligen Spektralanteil vorhanden.

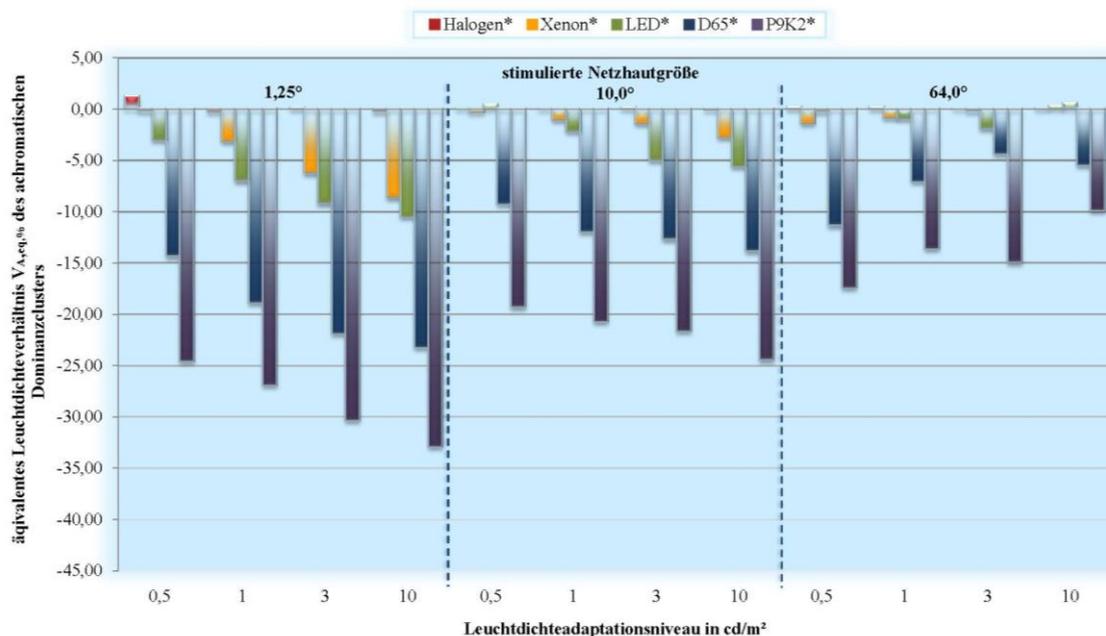


Abbildung 63: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des achromatischen Dominanzclusters ($V_{A,eq,\%}$: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis des achromatischen Dominanzclusters)

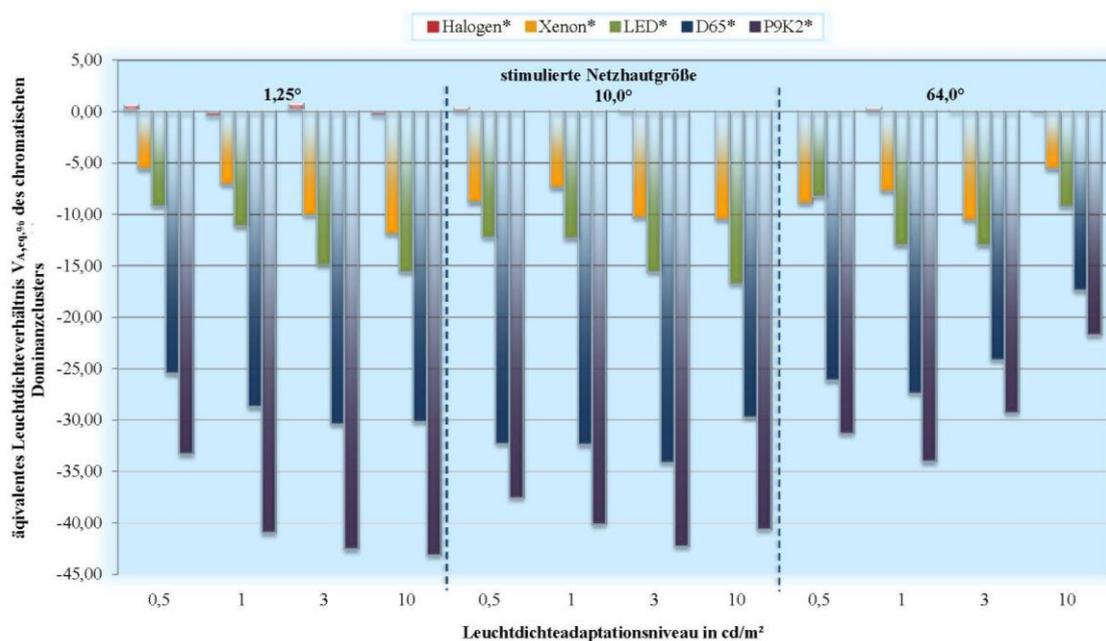


Abbildung 64: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des chromatischen Dominanzclusters ($V_{A,eq,\%}$: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis des chromatischen Dominanzclusters)

Inwieweit die chromatische Dominanz einen Einfluss auf das untersuchte Hellempfinden hat, ist in einer Gegenüberstellung der gemittelten $V_{eq, \%}$ je Cluster bei $\alpha=1,25^\circ$ dargestellt (Abbildung 65). Bei der gewählten stimulierten Netzhautgröße lässt sich am stärksten der Unterschied zwischen den betrachteten Gruppen demonstrieren, da von einem geringen bis nicht vorhandenen Stäbcheneinfluss ausgegangen werden kann. Somit erhalten nur die für den untersuchten Effekt identifizierten Einflüsse des chromatischen Limunanzkanals Gewicht. Die berechnete Differenz der mittleren äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse zwischen dem achromatischen Luminanzanteil der Zapfen und dem chromatischen Zapfenbeitrag am Hellempfinden ist an einer zweiten Ordinate angetragen. Deutlich ist ein Unterschied in der Bewertung der dargebotenen Stimuli je Gruppenzugehörigkeit festzustellen.

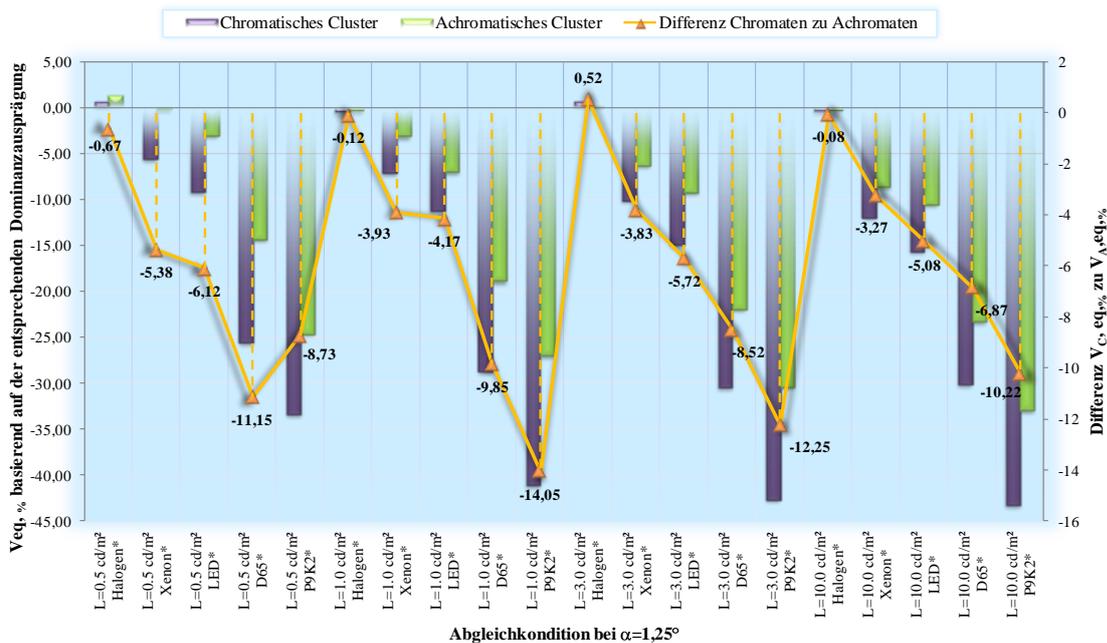


Abbildung 65: Differenz der dominanzbehafteten äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse eines mesopischen Hellempfindens für die stimulierte Netzhautgröße von $1,25^\circ$

Anhand dieses Sachverhalts ergeben sich vor dem Hintergrund einer Dominanzorientierung für die Anwendung der empirischen Ergebnisse u. a. folgende Überlegungen.

- Bildet die Hellempfindung ein Kriterium zur Beurteilung der psychologischen Blendung, in diesem Fall im mesopischen Bereich, und finden aktuelle Lichtsysteme auf Basis einer rein achromatischen spektralen Hellempfindungsfunktion Bewertung, erfahren Personen mit einer chromatischen Dominanz eine stärkere psychologische Blendung. In diesem Fall sollte, dem Sicherheitsaspekt folgend, eine Anpassung der Lichtsysteme über eine, dem chromatischen Dominanzverhalten geschuldete Empfindlichkeit erfolgen.
- Stellt die Hellempfindung die Grundlage für eine Objektdetektion dar, sollte eine Auslegung der Verwendung findenden Lichtsysteme auf achromatischer Basis stattfinden. Würde eine anders geartete Dimensionierung genutzt, würde aus dem gesteigerten Hellempfinden der Chromaten eine angenommene Mehrleistung hinsichtlich der Objektdetektion entstehen, welche im Umkehrschluss bei den Achromaten nicht vorhanden wäre. Diese würden, der aufgeführten Annahme Rechnung tragend, Objekte wesentlich später wahrnehmen, was wiederum eine verspätete Reaktion zur Folge hätte. Dem Aspekt einer Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr und anderer Anwendungsfälle wäre zuwidergehandelt (vgl. Kapitel 12).

11.3 Neubestimmung des Modellansatzes unter Berücksichtigung der Dominanzausprägung

Sowohl hinsichtlich der aufgeführten Unterschiede als auch ausgehend von der Dominanzausprägung ergeben zwei differenzierte Ansätze, welche dem Vorhaben einer rezeptororientierten Modellierung des untersuchten mesopischen Hellempfindens Folge leisten. Die Schritte zur Modellerzeugung je Dominanzcluster erfolgen vergleichbar mit der Vorgehensweise aus Kapitel 10. Ausgangspunkt bildet die Probandeneinteilung der durchgeführten Clusteranalyse.

Achromatische Ausrichtung

Bezüglich der modellbehafteten Beschreibung des achromatischen Clusters ergeben sich die einzelnen Glieder der achromatischen Wichtungsfaktoren a_A, b_A, c_A, d_A ähnlich zu Gleichung 24. Diese sind in Tabelle 23 aufgeführt. Mittels dieser lässt sich, äquivalent zum Berechnungsschema in Abbildung 58, eine Ermittlung der achromatisch dominanten, rezeptorbasierten, mesopischen Hellempfindung über ein äquivalentes Leuchtdichteverhältnis durchführen.

Für die Modellvalidierung wurde auf die schon bekannte Testprozedur aus Kapitel 11 zurückgegriffen. Die Restfehlerwerte sind Tabelle 36 des Anhangs zu entnehmen. Hierbei verringert sich der systeminterne Restfehlerwert, der externe steigt jedoch im Vergleich zum Gesamtmodell leicht an.

Konstantes Glied und Faktoren der Polynomglieder	Achromatischer Wichtungsfaktor			
	a_A	b_A	c_A	d_A
k	$-7,762 \cdot 10^{-4}$	$3,136 \cdot 10^{-1}$	$2,004 \cdot 10^{-1}$	$4,157 \cdot 10^{-1}$
f_1	$2,825 \cdot 10^{-4}$	$5,427 \cdot 10^{-2}$	$-2,243 \cdot 10^{-2}$	$-4,396 \cdot 10^{-2}$
f_2	$-2,207 \cdot 10^{-5}$	$-3,309 \cdot 10^{-4}$	$-5,327 \cdot 10^{-4}$	$3,045 \cdot 10^{-3}$
f_3	$1,63 \cdot 10^{-6}$	$3,321 \cdot 10^{-2}$	$-4,468 \cdot 10^{-3}$	$-1,414 \cdot 10^{-2}$
f_4	$-2,208 \cdot 10^{-5}$	$-1,345 \cdot 10^{-2}$	$5,762 \cdot 10^{-3}$	$5,249 \cdot 10^{-3}$
f_5	$1,565 \cdot 10^{-6}$	$8,92 \cdot 10^{-4}$	$-3,939 \cdot 10^{-4}$	$-3,467 \cdot 10^{-4}$
f_6	$1,274 \cdot 10^{-7}$	$-5,295 \cdot 10^{-4}$	$1,299 \cdot 10^{-4}$	$1,641 \cdot 10^{-4}$
f_7	$2,038 \cdot 10^{-7}$	$2,621 \cdot 10^{-4}$	$-1,236 \cdot 10^{-4}$	$-6,845 \cdot 10^{-5}$
f_8	$-1,228 \cdot 10^{-8}$	$-2,013 \cdot 10^{-5}$	$1,019 \cdot 10^{-5}$	$4,307 \cdot 10^{-6}$
Bestimmtheitsmaß R^2	0,944	0,9076	0,949	0,9736

Tabelle 23: Übersicht der Wichtungsfaktoren und deren Polynomglieder des durch achromatische Dominanz geprägten rezeptorbasierten Modells einer mesopischen Hellempfindung

Chromatische Ausrichtung

Durch ein Vorgehen, das dem eben beschriebenen gleicht, lässt sich äquivalent eine Modellierung des chromatischen Ansatzes durchführen und ergibt die einzelnen Glieder der chromatischen Wichtungsfaktoren a_C, b_C, c_C, d_C (Tabelle 24). Eine Berechnung äquivalenter Leuchtdichteverhältnisse mit dem Hintergrund der chromatischen Dominanz ist somit gegeben. Für die Ergebnisse der Modellvalidierung wird auf den Anhang verwiesen.

Konstantes Glied und Faktoren der Polynomglieder	Chromatischer Wichtungsfaktor			
	a_c	b_c	c_c	d_c
k	$-5,159 \cdot 10^{-4}$	$2,068 \cdot 10^{-1}$	$1,522 \cdot 10^{-1}$	$4,853 \cdot 10^{-1}$
f_1	$-1,291 \cdot 10^{-4}$	$3,854 \cdot 10^{-1}$	$-3,009 \cdot 10^{-1}$	$3,07 \cdot 10^{-2}$
f_2	$1,097 \cdot 10^{-5}$	$-2,753 \cdot 10^{-2}$	$2,251 \cdot 10^{-2}$	$-3,098 \cdot 10^{-3}$
f_3	$9,157 \cdot 10^{-5}$	$-6,135 \cdot 10^{-2}$	$3,311 \cdot 10^{-2}$	$-2,871 \cdot 10^{-3}$
f_4	$-2,296 \cdot 10^{-7}$	$-2,413 \cdot 10^{-2}$	$1,593 \cdot 10^{-2}$	$1,415 \cdot 10^{-3}$
f_5	$-5,098 \cdot 10^{-7}$	$2,477 \cdot 10^{-3}$	$-1,547 \cdot 10^{-3}$	$-1,475 \cdot 10^{-4}$
f_6	$-1,258 \cdot 10^{-6}$	$9,188 \cdot 10^{-4}$	$-4,72 \cdot 10^{-4}$	$1,114 \cdot 10^{-5}$
f_7	$7,146 \cdot 10^{-8}$	$3,369 \cdot 10^{-4}$	$-1,877 \cdot 10^{-4}$	$-5,41 \cdot 10^{-5}$
f_8	$1,633 \cdot 10^{-9}$	$-3,667 \cdot 10^{-5}$	$2,007 \cdot 10^{-5}$	$5,003 \cdot 10^{-6}$
Bestimmtheitsmaß R^2	0,8207	0,9728	0,9388	0,8533

Tabelle 24: Übersicht der Wichtungsfaktoren und deren Polynomglieder des durch chromatische Dominanz geprägten Rezeptorbasierten Modells einer mesopischen Hellempfindung

Kennzeichen für die Angehörigen des chromatisch dominanten Clusters sind erhöhte äquivalente Leuchtdichteverhältnisse, ergo die Hellempfindung, vergleichend zum achromatischen System und dem Gesamtmodell (Anhang zu Kapitel 10 & 11). Deutlich ist ein erhöhter Anteil der chromatischen Komponente des Luminanzkanals an der Hellempfindung zu erkennen (vgl. Abbildung 65).

11.5 Ergebnisse und Empfehlungen für aufbauende Forschungsarbeiten

Der in diesem Kapitel betrachtete Sachverhalt eines vorkommenden Dominanzverhaltens zeigt, wie stark ein chromatischer Anteil am Hellempfinden, verursacht von den Zapfen, ausgeprägt sein kann. Von den in Kapitel 2.2 beschriebenen „Prinzipien des Sehvorgangs“ ausgehend und ergänzend damit den vorhandenen Methoden zur Messung spektraler Empfindlichkeiten, liegt die Differenzierung von zumindest zwei Dominanzhauptgruppen und deren Eigenheiten nahe. Zu unterscheiden sind Personen mit achromatischer oder chromatischer Dominanz. Die aktuelle Forschungsarbeit und das Bewusstsein über die Effektexistenz und deren Auswirkungen stehen derzeit noch am Anfang, obwohl bereits durch PALMER (1985) erste Studien dieses thematischen Hintergrundes publiziert wurden. Durch die Einbeziehung des Dominanzverhaltens erfährt die Photometrie eine zusätzliche Dimension hinsichtlich Studiendurchführungen, der Lichtwahrnehmung und -messtechnik sowie der applikationsbezogenen Realisierung. Gefundene erhebliche Standardabweichungen bei Studien, beispielsweise die Quantifizierung des Hellempfindens betreffend, können durch das Vorkommen heterogener Dominanzgruppen erfolgt sein. Da auf Grund der Ergebnisse dieser und vorangegangener Arbeiten ein erheblicher Einfluss des Dominanzverhaltens auf das Hellempfinden festgestellt wurde, ergeben sich neue Forschungsfelder beispielsweise einer Neubewertung der psychologischen Blendung, der Farberscheinung, des Hellempfindens etc. Sollte sich ein Einfluss des Hellempfindens auf eine Objektdetektion herausstellen, beispielsweise durch den Einfluss einer Stimulusmodifikation um den Betrag eines äquivalenten Leuchtdichteverhältnisses, ist die Dominanzausprägung zu beachten.

Im Verlauf der vorliegenden Forschungsarbeit wurde der Einfluss einer chromatisch oder achromatisch ausgeprägten Dominanz auf das Hellempfinden untersucht. Diesbezüglich liegen für spezifische Situationen Kennwerte zur Anwendung vor. Erweiternd stehen definierte Modelle für die Berechnung von Kennwerten, die jeweilige Ausprägung betreffend, zur Verfügung.

Sollte ein Einfluss der Dominanzausprägung auf zu untersuchende Variablen nicht auszuschließen sein, sind für entsprechende Forschungsfragen Stichprobenprüfungen durchzuführen. Ein vereinheitlichter Test existiert derzeit nicht. Weiterhin ist künftig zu erörtern, wie genau eine Gruppeneinteilung hinsichtlich einer Ausprägung der spektralen Empfindlichkeit notwendig ist. Für einen zu entwickelnden Schnelltest kann auf Ergebnisse der wissenschaftlichen Literatur zurückgegriffen werden, in welcher einzelne Ausprägungen der spektralen Empfindlichkeit aufgezeigt sind (vgl. Kap.12.2).

Hinsichtlich einer Bestimmung der Dominanzzugehörigkeit lassen sich zwei grundlegende Vorgehensweisen benennen. Im ersten Fall sind Abgleiche bezüglich der Hellempfindung durchzuführen sowie durch aufwändige Berechnungen zu ergänzen. Dem Folgend stellen IKEDA ET AL. (1992) und YAGUTCHI ET AL. (1993) einen Algorithmus unter Anwednung einer Komponenteanalyse vor. Stützstellen bieten Hellempfindungsabgleiche von zwei Test- auf eine Referenzwellenlänge. Ähnlich aufwendig stellt sich das Verfahren nach BODROGI ET AL. (2009) dar. Das vorliegende Verfahren der Clusteranalyse ist nur bei entsprechend großer Stichprobenanzahl und empirischer Datensätze zu wählen.

Ein weitaus pragmatischers Vorgehen zeigen MINODA ET AL. (2007). Anhand von fünf über das visuelle Spektrum verteilten Wellenlängen, erfolgte ein Abgleichen auf gleiche Hellempfindung. Abweichungen lassen sich hinsichtlich eines achromatischen Verhaltens ($V(\lambda)$ etc.) aufzeigen und im Ergebnis die Dominanzausprägung feststellen.

Für eine einfache Probandeneinordnung lässt sich folgendes Vorgehen als standardisierter Schnelltest denken:

1. Zuzüglich zu einer standardisierten Testumgebung (Adaptationsbedingungen, Sehfeldgröße etc.) sind neben einer Referenzwellenlänge (bspw. 570 nm oder 555 nm) zumindest zwei weitere Testwellenlängen im kurzwelligen sowie langwelligen Spektralbereich darzubieten und auf gleiches Hellempfinden bezüglich der Referenz einzustellen. Eine Gegenüberstellung der Abgleichsergebnisse einer additiven Methode (z.B. FP, MDB) und einer Vorgehensweise den chromatischen Kanal mit einbeziehend, hat zu erfolgen. Auf Basis der eingestellten spektralen Empfindlichkeiten und deren eventuellem Versatz zueinander kann eine Dominanzzuweisung durchgeführt werden. Stellen sich nur sehr geringe Unterschiede heraus, ist die getestete Person dem achromatischen Cluster zuzuordnen.
2. Wird von einer zweigeteilten Dominanzausprägung ausgegangen, kann weiterhin ein Abgleich spektraler Verteilungen auf eine Referenz erfolgen, welche nur geringe chromatische Unterschiede zu dieser besitzen (bspw. Xenon, LED auf Halogen). Für Achromaten müssten sich die eingestellten äquivalenten Leuchtdichten innerhalb der Standartabweichung kaum unterscheiden (Plateaubildung). Bei chromatischer Dominanz liegt ein ansteigender Einfluss der chromatischen Komponente des Luminanzkanals vor (Zunahme des Unterschieds der Leuchtdichte zw. Ref- und Testspektrum). Bei Verwendung vorhandener Daten aus Untersuchungen (bspw. Aus vorhandener Arbeit), ist ein eventueller Methodeneinfluss (SBBM zu anderen Vorgehensweisen) zu beachten.

Für eine genauere Charakterisierung des dargelegten Effekts sind jedoch unbedingt weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

KAPITEL 12

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Kapitel 12 ist in drei Teile gegliedert. Im ersten Abschnitt ist eine Zusammenfassung der grundlegenden Aspekte und durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten gegeben. Einige Aspekte sind zusätzlich diskutiert. Eine detaillierte Ergebnisbewertung und –diskussion ist den einzelnen, themenorientierten Kapiteln zu entnehmen.

An die Zusammenfassung schließt sich ein Ausblick über die aktuelle Verwendbarkeit der erzielten Ergebnisse dieser Arbeit an.

Den Abschluss bildet eine Auflistung von Forschungsfragen, welche sich aus dieser Arbeit ableiten lassen.

12.1 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, durch neue Ansätze eine mesopische Hellempfindung des Menschen zu beschreiben und in eine Methodik zur Anwendung zu überführen. Da eine Messung lichttechnischer Größen im Mesopischen derzeit noch mit zu vielen Unzulänglichkeiten behaftet ist, erfolgt eine Bestimmung der relativen Hellempfindung. Es schließt sich eine Überführung in die Maßzahl des äquivalenten Leuchtdichteverhältnisses an. Es kann eine Abhängigkeit der Hellempfindung neben dem Adaptationsniveau auch von der spektralen Verteilung und der Netzhautstruktur vorausgesetzt werden und somit erfolgte eine Versuchskonzeption, diese Variablen betreffend, mit theoretischem und praktischem Hintergrund.

Im Zuge einer wahrnehmungsgetreuen Abbildung des Hellempfindens sind mehrere Bewertungssysteme der spektralen Empfindlichkeit, in Anpassung an die betrachteten Einflussvariablen, gewählt worden. Die genutzten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen und deren Zusammensetzung in genannte Bewertungssysteme dienen schließlich zur Überführung einer Empfindung in eine beschreibende Maßzahl. Diesbezüglich ist nicht die dem 2° Normalbeobachter ($V(\lambda)$) entsprechende Leuchtdichte genutzt. Vielmehr ergibt sich durch den verwendeten Abgleich spektraler Verteilungen durch den Probanden die Möglichkeit, nicht leuchtdichtemessgerät-behaftete Analysen durchzuführen. Eine folgende Konvertierung der vorliegenden radiometrischen Daten in eine photometrische Größe, die SI-Basiseinheit *Candela* berücksichtigend, ist somit möglich. Der Vergleich äquivalenter Leuchtdichten innerhalb sich unterscheidender Bewertungssysteme stellt sich als probates Mittel dar.

Für eine diesbezügliche Realisierung der spektral basierten Hellempfindungsabgleiche stellen sich enorme Herausforderungen an den Versuchsstand, welcher nach Realisierung einer umfangreichen Erprobung unterlag. Durch die erstmalige Verwendung einer spektral programmierbaren Lichtquelle ist die reproduzierbare Erzeugung genauer spektraler Verteilungen gegeben. Neben den praktisch relevanten Spektren Halogen, Xenon und LED sind auch nicht verfügbare, jedoch theoretisch relevante, spektrale Verteilungen als Lichtquelle erzeugt worden (D65, P9K2). Ausgehend vom innovativen, kalibrierten und linearisierten Forschungsstand ergeben sich vielseitige Forschungsmöglichkeiten, jedoch auch gravierende Restriktionen. Probleme hinsichtlich nichtlinearer spektraler Systemabbildungen können mit dem ausgearbeiteten Korrekturprozess behoben werden. Für eine erste, automatisierte Einstellung der spektral programmierbaren Lichtquelle OL 490 stehen zwei selbstentwickelte Programmteile zur Verfügung. Mittels „Spektrum Generator“ ist eine komplette An- und Versuchssteuerung implementiert worden, welche auch eine echtzeitfähige Modifikation des Spektrums zulässt. Der zweite Programmteil „SpecPack“ befasst sich mit der Vermessung des Lichtprimärs und der Systemlinearisierung sowie der Erzeugung von Stimuluspektren.

Eine Kernforderung der vorliegenden Arbeit ist die Betrachtung der mesopischen Hellempfindung unter Einfluss aller Rezeptoren und höherer visueller Verarbeitungsstrukturen. Nur diese Grundgesamtheit der Signale des achromatischen Luminanzkanals (Stäbchen und Zapfen) und dem Beitrag aus dem chromatischen Luminanzkanal stellen eine wahrnehmungsabbildende, empfindungsgemäße Größe dar.

In der Literatur steht eine Vielzahl von Methoden zur Evaluation einer Hellempfindung bereit. Nach Bewertung und Vergleich dieser stellt sich, auf Basis der dieser Arbeit zugrunde liegenden Variablen und Hypothesen, die neuartige Methode des „Successive Binocular Brightness Matching“ (SBBM) als zu empfehlende Lösung heraus. Die bis dato vermuteten Vorteile der SBBM überzeugen auch in der praktischen Anwendung. Somit kann die verwendete Methode als quali-

tativ hochwertige Alternative zu bisher etablierten Verfahren des Direktvergleichs und des gedächtnisbasierten Vergleichs, für künftige Forschungsfragen genutzt werden.

Die erhobenen Abgleichdaten, beruhend auf einer Stichprobe von 24 Probanden sowie einem Messwiederholungsdesign, stellen die Grundlage für eine inferenzstatistische und deskriptive Analyse dar. Während, entgegengesetzt zu den geäußerten Vermutungen, kein signifikanter Einfluss des Alters oder des Geschlechts auf ein mesopisches Hellempfinden gefunden wurde, wirken sich die Einflussfaktoren der spektralen Verteilung, des Leuchtdichteadaptationsniveaus und der stimulierten Netzhautgröße, wie vermutet, signifikant auf die abhängige Variable aus. Für die nicht signifikanten Effekte, insbesondere das Alter betreffend, kann eine anders zusammengesetzte Stichprobe jedoch zu revidierenden Ergebnissen führen. Trotz Anwendung wahrnehmungsangepasster, neuerer spektraler Empfindlichkeitsfunktionen und deren Einordnung in Bewertungssysteme konnte keine der genutzten spektralen Bewertungen (Bewertungssysteme) für eine Modellbildung mittels der erhobenen empirischen Daten herangezogen werden. Dennoch dienen die vorliegenden äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse als Kennwerte für ähnliche realitätsnahe Situationen und erlauben Abschätzungen auf vermutete Effekte und Größenrelationen.

Zur Durchführung einer Modellbildung für die Beschreibung der mesopischen Hellempfindung ergibt sich die Forderung, alternative Ansätze zu analysieren. Ausgehend von den am mesopischen Sehen beteiligten Rezeptoren und deren Verteilung auf der Retina erfolgt auf Basis der vorliegenden spektralen Abgleiche die Verwendung rezeptorbasierter spektraler Empfindlichkeitsfunktionen. Eine Rückführung der Hellempfindung auf die erste stimulierte retinale Ebene (Rezeptorebene) eröffnet für die Berechnung systemäquivalenter Leuchtdichteverhältnisse die Möglichkeit einer dreidimensionalen Modellbildung, welche vor allem Effekte der retinal stimulierten Fläche berücksichtigt. Für den Anwender steht ein auf vier Komponenten beruhendes Berechnungsmodell zur Verfügung, um die relative Hellempfindung unterschiedlicher, jedoch systemgrenzeninterner spektraler Verteilungen zu bestimmen. Die Wirkung von breitbandigem Licht in einem mesopischen Kontext kann somit eingeschätzt werden und als Planungs- und Dimensionierungshilfe einer wahrnehmungsorientierten Einschätzung der Hellempfindung Nutzung finden. Mit anderen Worten erlaubt dies eine Beschreibung dessen, was wir sehen, nicht was Geräte messen. Aus einer anschließend durchgeführten Validierungsprozedur, angelehnt an jene der CIE 141, stellen sich für die festgesetzten Systemgültigkeitsgrenzen deutlich geringere Restfehlerwerte heraus, als jene der getesteten „ergänzenden Systeme der Photometrie“.

Erweiternd findet eine Auseinandersetzung mit der gefundenen Abhängigkeit der Hellempfindung von einer, dem visuellen Wahrnehmungssystem anhaftenden Besonderheit statt – dem visuellen Dominanzverhalten. In der Wissenschaft bisher fast unbeachtet, unterteilt sich die spektrale Empfindlichkeit des Menschen zumindest in eine chromatische oder achromatische Dominanz. Daraus resultierend stellt sich bei einigen Personen eine verminderte Hellempfindung ein, da diese über keinen oder nur einen sehr geringen Input des chromatischen Luminanzkanals (spektrale Empfindlichkeitsfunktion) verfügen (achromatische Dominanz). Im Gegensatz dazu besitzen „Chromaten“ eine deutliche Erhöhung spektraler Empfindlichkeiten, insbesondere im kurzwelligen und/oder langwelligen Spektralbereich. Es ergeben sich weitreichende Konsequenzen für zukünftige Forschungen sowie die Auslegung lichttechnischer Systeme und Heuristiken in Bezug auf das Kriterium Hellempfindung sowie darauf aufbauende Aspekte. Hinsichtlich dieses Sachverhalts erfolgt eine Separierung der Probandengruppe in Cluster und darauf aufbauend eine Gesamtmodellvariation. Für die Betrachtung einer mesopischen Hellempfindung und des Kriteriums der Dominanz stehen für beide identifizierten Dominanzausprägungen spezielle Berechnungsmodelle zur Verfügung.

Insgesamt stehen somit ein Gesamtmodell und zwei spezielle Modellierungen zur rezeptororientierten Beschreibung einer mesopischen Hellempfindung breitbandiger Spektren für die Anwendung bereit. Es sei darauf hingewiesen, dass die Systemgültigkeit nur innerhalb der betrachteten Parameter gegeben ist. Eine Extrapolation von Daten und damit außerhalb der Systemgrenzen liegender systemäquivalenter Leuchtdichten ist nicht vorgesehen. Eine Aussage über ein Hellempfinden ist nur im oberen mesopischen Leuchtdichteadaptationsbereich (0,5-10 cd/m²), einer stimulierten Netzhautgröße von minimal 1,25° und maximal 64° sowie breitbandigen Spektren im „Weißbereich“ gegeben. Weiterhin ist anzumerken, dass ein gesteigertes Hellempfinden, wie es der PURKINJE-Effekt und darauf aufbauende wissenschaftliche Arbeiten belegen, keine Aussage zu einer gesteigerten Objektdetektionsleistung zulässt. Dies ist noch in ausreichendem Maße zu untersuchen. Mittels Eye-Tracking-System ließe sich ein Kontrollmechanismus für kleine Sehfeldgrößen realisieren und Effekte aus einer etwaigen Blickbewegung wären abschätzbar.

12.2 Ergebnisse

Nachfolgend sind die Kernergebnisse der vorliegenden Arbeit aufgeführt, welche sofortige praktische Verwertungsmöglichkeiten aufzeigen.

Forschungsaufbau

Durch den realisierten Forschungsaufbau ist es möglich, komplexe spektrale Verteilungen, unabhängig von deren physischem Vorhandensein, zu erzeugen. Eine hohe Reproduzierbarkeit und Genauigkeit ist ebenso gegeben, wie eine Unabhängigkeit von beeinflussenden Effekten des jeweiligen Leuchtmittels. Es besteht die Freiheit, jedes erdenkliche Lichtspektrum zu erzeugen und innerhalb der Gerätegrenzen darzubieten sowie in Echtzeit zu modifizieren. Eine Identifikation von qualitätsbeeinflussenden Effekten, die Beurteilung der Farberscheinung von Materialien, Hellempfindungsvergleiche und die Erzeugung spezieller Empfindlichkeitsfunktionen stellen nur einige Einsatzgebiete dar. Für die Nutzung steht nunmehr ein gebündeltes Wissen bereit, welches Ergänzung durch die entwickelten Programmteile der Ansteuerung und Spektrenerzeugung findet.

Methode

Im qualitativen Vergleich wie auch in der quantitativen empirischen Gegenüberstellung hat sich die Methode des Successive Binocular Brightness Matching klar behauptet. Neben geringeren Standardabweichungen und einer sehr guten Abgleichreproduktion im NCT zeichnet sich das SBBM besonders durch die einfache Handhabung für die Probanden aus. Weiterhin bildet die gewählte Methode ein durchaus realitätsnahes Abgleichkriterium nach, indem eine Person eine zu beurteilende Szenerie selten simultan mit einer anderen Szenerie wahrnimmt (mit Ausnahme sehr eng benachbarter), sondern eher nach einer Einprägung vergleichend und zeitlich aufgelöst bestimmte Szenerien einer Beurteilung unterzieht.

Kennzahlen

Hinsichtlich der durchgeführten empirischen Untersuchungen ist ein Pool an Kennzahlen, die Hellempfindung für spezielle Anwendungssituationen wiedergebend, entstanden. Diese können für die Anwendung auf spezielle Szenarien verwendet werden. Beispielsweise geben sie die

Möglichkeit, z. T. unter Annahme der Gültigkeit der Transitivität und unter Berufung auf das Kriterium gleicher Hellempfindung, einzelne Spektren soweit im Lichtstrom abzusenken, dass weniger elektrische Energie in ein Lichtsystem eingekoppelt werden muss. Eine Steigerung der Energieeffizienz ist durch Nutzung des hier quantisierten physiologischen Faktors denkbar. Diesbezügliche Auswirkungen, bspw. eine Objektdetektion betreffend, sind zu überdenken und forschungsseitig zu prüfen.

Zusätzlich ermöglichen die vorliegenden Kennzahlen einen Vergleich mit bestehenden Helligkeitsabgleichen unter ähnlichen Bedingungen und lassen teilweise nur ein sehr kritisches Urteil zu.

Modellierung

Erstmals liegt ein Rezeptorbasiertes Modell zur Beschreibung der mesopischen Hellempfindung vor. Unter Beachtung der Systemgrenzen lassen sich systemäquivalente Leuchtdichten unterschiedlicher Spektren mit Bezug auf die Referenz berechnen und Aussagen zu deren Wirkung auf die Hellempfindung treffen. Erweiternd ergeben sich die Möglichkeiten, welche schon unter dem Punkt Kennzahlen aufgezeigt wurden, wobei nun auch für allgemeingültigere Voraussetzungen eine Berechnung erfolgen kann. Zu nennen sind beispielsweise sowohl die Charakterisierung eines subjektiven Homogenitätskriteriums bei Hybridlichtquellen als auch eine Aufmerksamkeitslenkung durch Betrachtung eines Hellempfindungsunterschiedes verschiedener breitbandiger Spektren (Anzeigeelemente).

Visuelle Dominanz

Durch die Untersuchung der genannten Dominanz ergeben sich weitreichende Aufschlüsse über visuelle Vorgänge und deren Komplexität. Weiterhin ermöglichen die gefundenen Zusammenhänge einen Ansatzpunkt zur Einschätzung von Standardabweichungen bei Untersuchungen der Hellempfindung. Es gilt in diesem Zusammenhang zu erörtern, inwiefern festgestellte Dominanzeffekte auf die Gültigkeit einer spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion wirken. Letztlich ist mit den aufgestellten Modellen einer rezeptorbasierten Hellempfindung, eine Ausprägung die Dominanz betreffend, die Auslegung lichttechnischer Systeme und Situationen, dieses Merkmal einbeziehend, möglich. Dabei lässt sich die Überlegung äußern, dass eine vorzunehmende Auslegung von Lichtsystemen immer dem Minimalkriterium folgen sollte. Damit ist gemeint, dass je nach Situation nur die Leistungsparameter Verwendung finden sollten, welche keine der existierenden Ausprägungen visueller Dominanz benachteiligt. Beispielsweise haben Vertreter der chromatischen Dominanz eine gesteigerte spektrale Empfindlichkeit gegenüber den Achromaten. Gemessen wird $V(\lambda)$ -basiert, somit mit achromatischer Orientierung.

Hinsichtlich der psychologischen Blendung und einer Bewertung dieser Systeme empfinden chromatisch dominante Personen das besagte System als zu hell, also mehr blendend. Im Sinne des Minimalkriteriums sollten solche Systeme somit eher auf das Hellempfinden der Chromaten ausgelegt werden, wodurch diese weniger psychologische Blendung erfahren. Die Achromaten nehmen dann zwar eine geringere Helligkeit wahr, jedoch erfährt keine Gruppe eine extreme Benachteiligung.

12.3 Zukünftige Forschungsaspekte

Neben den im Kapitel 12.2 vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten der vorliegenden Arbeitsergebnisse ergeben sich weitreichende potentielle Forschungsaspekte. Ausgehend vom vorliegenden Modellansatz, sind weitere Untersuchungen durchzuführen. Diese sollten neben einer Erhöhung der Probandenanzahl vor allem nochmals die Variable Alter einbeziehen. Ein Einfluss des Alters auf eine Hellempfindung konnte mit der betrachteten Probandenstichprobe und dem scheinbar doch zu geringen Alter der Ergänzungsgruppe nicht nachgewiesen werden. Dennoch ist vor dem Hintergrund der stattfindenden demographischen Entwicklung das Wissen über eventuelle Abhängigkeiten wichtig. Sollte sich ein Einfluss unter Hinzuziehung einer älteren Probandengruppe herausstellen, ist zu klären, inwieweit der existente Modellansatz zu revidieren ist, oder ein, diese Abhängigkeit symbolisierender Altersfaktor Anwendung finden sollte. Eine Untersuchung weiterer breitbandiger spektraler Verteilungen und niedrigerer Leuchtdichteadaptationsniveaus kann die Modellgenauigkeit steigern und die Systemgrenzen erweitern.

Methode

Es hat sich gezeigt, dass die Methode des SBBM sehr gut anwendbar ist und sich im Vergleich zu anderen Methoden weniger defizitbelastet darstellt (Kapitel 3.5). Eine interessante Fragestellung ergibt sich hinsichtlich der Erstellung spektraler Empfindlichkeitsfunktionen und dem Vergleich dieser mit bereits existierenden. Neben der Berücksichtigung des chromatischen Anteils durch den niederfrequenten Abgleichvorgang, zeichnet sich die Methode durch die Stimulation einer definierten Netzhautregion mit einem Spektrum aus. Simultankontraste, lokale Inhibitionseffekte und dergleichen sind minimiert. Bei Erstellung sollte das Kleinschrittverfahren Anwendung finden. Eventuelle Auswirkungen auf bisherige Studienergebnisse und die wissenschaftliche Literatur sind zu diskutieren.

Weiterhin können spektrale Empfindlichkeitsfunktionen für spezielle Netzhautgrößen erhoben werden, wodurch ein Einfluss von sich ausprägenden, perzeptiven Feldern und der Einfluss der stimulierten Netzhautfläche an sich untersucht werden kann. Eine Unterteilung der erhobenen Empfindlichkeitsfunktionen nach Sinnhaftigkeit ist an den sich ergebenden Unterschieden auszurichten.

Forschungsstand

Der Forschungsstand und dessen Kernstück, das OL 490, bieten eine Reihe an Potentialen. Mit OPTRONIC LABORATORIES bestand ein reger Informations- und Innovationsaustausch zur Verbesserung der Geräteeigenschaften. In einer weiteren Forschungszusammenarbeit sind zuerst die Hardware und die Leistungsparameter zu optimieren. Für eine stabilere und längere Lebensdauer ist das Lampenkühlmanagement zu verbessern und eventuell ein Zustandsschalter für einen modularen Betrieb mit einer 500W oder 700W Xenon-Höchstdruck-Lampe zu implementieren. Ein erhöhter Dynamikbereich in der Lichtausbeute wäre die unmittelbare Folge. Dementsprechend ist das Material des Spaltes anzupassen. Derzeit entstehen sehr schnell Abnutzungerscheinungen des Spaltes, was zu einer Einbuße der spektralen Genauigkeit und Ansteuerbarkeit geplanter lichttechnischer Parameter führt. Denkbar wäre auch die Implementierung eines akusto-optischen Diffraktionsgitters, welches eine Variierbarkeit des abbildbaren Spektralbereichs ermöglicht.

In den entsprechenden Kapiteln dieser Arbeit ist die Schwierigkeit einer genauen Spektrenerzeugung erläutert. Einzelne Aspekte für die Erleichterung des Vorgangs wurden mit OPTRONIC LABORATORIES erörtert und als gangbar befunden. Ein erster Schritt wäre die Ansteuersoftware zu verbessern und mit einer Rückkopplung für ein Spektroradiometer zu versehen. Ein iterativer Regelmechanismus könnte dann die Abweichungen des simulierten Spektrums vom Sollspektrum je Wellenlänge ausgleichen. Unter Angabe bestimmter Parameter könnte die Erzeugung einer gewünschten Strahldichte oder Leuchtdichte automatisiert erfolgen. Ein etwaiger Einfluss von benachbarten Spiegelspalten des DMD fände Berücksichtigung. Sollte nicht immer ein Spektroradiometer vorhanden sein, ließe sich die vorliegende softwarebasierte Linearisierungsprozedur und Spektreineinpassung weiter automatisieren.

Energieeffizienz und Kennwerte der Hellempfindung

Die Hellempfindung bildet einen grundsätzlichen Vorgang der visuellen Wahrnehmung. Das Sehen erfolgt empfindungsbasiert. Gleiches gilt für eine Objektwahrnehmung, welche derzeit über Kontraste beschrieben wird. Der Mensch nimmt somit Helligkeiten wahr und bewertet daran Kontraste. Ob Leuchtdichten, welche für eine Kontrastbestimmung herangezogen werden, als alleiniges Bestimmungsmerkmal im Mesopsichen dienen, ist zu erforschen. Durch den mesopsichen Bereich (PURKINJE-Effekt) und dessen Besonderheiten hinsichtlich einer Hellempfindung kommt es verstärkt zu einer Brightness-Luminance-Discrepancy. Ebenso wie es zu einer Verstärkung der Hellempfindung mit sinkendem Leuchtdichteadaptationsniveau und zunehmendem kurzwelligen Spektralanteil kommt, kann ein Einfluss dieses Effekts auf die Objektdetektion nicht ausgeschlossen werden.

Stellt die Hellempfindung und damit ein äquivalentes Leuchtdichteverhältnis das Dimensionierungskriterium dar, kann ein Spektrum, welches heller empfunden wird, als ein anderes, im Lichtstrom soweit gesenkt werden, bis eine gleiche Hellempfindung unter sonst konstanten Bedingungen erreicht ist. Dies würde zu einer Energieeinsparung hinsichtlich des vormals ungesenkten Systems führen. Jedoch ist zu bedenken, dass damit eine Verminderung des Sicherheitsaspekts, also der Objektwahrnehmung, einhergehen kann. Sich ergebende Auswirkungen sind unter der genannten Anpassung zu prüfen.

Visuelle Dominanz

In Bezug auf den Forschungsbereich der visuellen Dominanz ist vor allem eine Identifizierungsmethode für das Vorkommen der jeweiligen Ausprägung zu entwickeln, oder es sind die vorgeschlagenen zu testen. Weiterhin ist zu erörtern, ob eine Clusterung in die hier betrachteten zwei Ausprägungen ausreichend ist.

Eine Forschungsarbeit bezüglich der Auswirkung einer Dominanz auf die Objektdetektion steht noch aus.

Literaturverzeichnis

- [ADRIAN 1994] Adrian, W.; Gibbons, R. (1994). Visual performance and its metric. In: *Light and Engineering*. Vol. 2/3. pp. 1-34.
- [AG3] Department für Geographie der Ludwig-Maximilians-Universität München, (o. J.). Spektrale Reflexionseigenschaften von reinem BaSO₄ und von Halon. [Online Document] URL <http://www.geographie.uni-muenchen.de/internetvorlesung/spektroskopie/Nebenseiten/AG3-1b.htm>. (04.02.2011).
- [AGUILAR 1954] Aguilar, M.; Stiles, W. S. (1954). Saturation of the rod mechanism of the retina at high levels of stimulation. In: *Optica Acta* 1. pp. 59-64.
- [ALFERDINCK 1996] Alferdinck, J. W. A. M. (1996). Traffic safety aspects of high-intensity discharge headlamps: discomfort glare and detection indicator conspicuity. In: *Vision in Vehicles*. pp. 337-344.
- [ALFERDINCK 2006] Alferdinck, J. W. A. M. (2006). Target detection and driving behaviour measurements in a driving simulator at mesopic light levels. In: *Ophthalmic Physiology and Optics*. Vol. 26. pp. 264-280.
- [ALFERDINCK 2009] Alferdinck, J. W. A. M.; van der Leden, N. (2009). Optimum luminous intensities of traffic lights for day and night. *Lux Europa 2009*. Istanbul.
- [ASENJA 1994] Asenja, A. B.; Rim, J. Oprain, D. D. (1994). Molecular determinants of human red/green color discrimination. In: *Neuron*. Vol. 12. Cell Press. pp. 1131-1138.
- [BACKHAUS 2000] Backhaus, W.; Erichson, B.; Plinke, W.; u. a. (2000). *Multivariate Analysemethoden – Eine anwendungsorientierte Einführung*. 8. Auflage. Heidelberg: Springer Verlag. S. 98-100; 348-367; 383.
- [BAER 2006] Baer, R. (2006). *Beleuchtungstechnik*. 3. Auflage. Berlin: Verlag der Technik. S. 18.
- [BALAZSI 1984] Balazsi, A.G.; Rootman, J.; Drance, S.M.; et al. (1984). The effect of age on the nerve fibre population of the human optic nerve. In: *American Journal of Ophthalmology*. Vol. 97. pp. 760-766.
- [BARBUR 2010] Barbur, J. L. ; Stockman, A. (2010). Photopic, mesopic and scotopic vision and changes in visual performance. In: Dartt, D.A.; Besharse, J. C.; Dana, R. (eds.). *Encyclopedia of the Eye*. Vol. 3. Oxford: Academic Press. pp. 323-331.
- [BEDFORD 1953] Bedford, R. E.; Wyszecki, G. W. (1953). Luminosity functions for various field sizes and levels of retinal illuminance. In: *Journal of the Optical Society of America*. Vol. 48/6. pp 406-411.
- [BERKE 1996] Berke, A.; Münschke, P. (1996). *Screening – Prüfmethode der Optometrie*. Heidelberg: DOZ-Verlag.
- [BERKE 1999] Berke, A. (1999). *Biologie des Auges*. Mainz: WVAO.
- [BERMAN 1987] Berman, S. M.; Jewett, D. L.; Fein, G.; et al. (1987). Pupillary size differences under incandescent and high pressure sodium lamps. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society*. Vol. 16/1. pp. 3-20.
- [BLUMTRITT 2004] Blumtritt, S. (2004). *Application story white light – white light lab test 2*. Final Technical Report. Ilmenau: TU Ilmenau.
- [BODMANN 1961] Bodmann, H. W. (1961). Zur Frage einer allgemeingültigen Hellempfindungsskala. In: *Lichttechnik* 13. Jahrgang. Nr. 1. S. 19-21.

- [BODMANN 1980] Bodmann, H. W.; Haubner, P.; Marsden, A. M. (1980). A unified relationship between brightness and luminance. In: Proceedings of the CIE 19th Session Kyoto 1979. Vienna: CIE 1980. pp. 99-102.
- [BODMANN 1987] Bodmann, H. W.; Kokoschka, S.; Greule, R. (1987). Contrast thresholds at transient adaptation. In: CIE Conference. Venezia. pp. 50-53.
- [BODMANN 1992] Bodmann, H.W. (1992). Elements of photometry, brightness and visibility. In: Lighting Research and Technology. Vol. 24(1). pp. 29-42.
- [BODROGI 1999] Bodrogi, P. Schanda, J. (1999). Heterochromatic Memory Brightness Matches. In: CIE 24th Session. Warsaw: CIE. pp. 73-76.
- [BODROGI 2001] Bodrogi, P.; Nolte, R. (2001). Untersuchungen zum Kontrasterinnerungsvermögen. Lux Junior 2001. Ilmenau.
- [BODROGI 2003] Bodrogi, P.; Várady, G.; Szalmàs, A.; et al. (2003). Schwellenkontrast im mesopischen Bereich. Lux Junior 2003. Arnstadt.
- [BODROGI 2005] Bodrogi, P.; Szalai, A; Várady, G. (2005). Mesopic luminous efficiency functions: effect of the size and shape of the visual target. Lux Junior 2005. Dörfeld.
- [BODROGI 2009] Bodrogi, P.; Böll, M.; Schiller, C.; et al. (2009). Brightness appearance of automotive lighting light sources – a series of visual experiments. Darmstadt: ISAL. pp. 65-71.
- [BODROGI 2010] Bodrogi, P.; Schiller, C.; Haferkemper, N.; et al. (2010). Jüngste Labor-testergebnisse der mesopischen Helligkeitswahrnehmung verschiedener Straßenlampenspektren und weißer LEDs. Licht 2010. Wien. S. 43-46.
- [BOYCE 2003] Boyce, P. R. (2003). Human factors in lighting. 2nd Edition. New York: Taylor & Francis Inc.
- [BOYNTON 1980] Boynton, R. M.; Wisowaty, J. J. (1980). Temporal modulation sensitivity of the blue mechanism: measurements made without chromatic adaptation. In: Vision Research. Vol. 20. pp. 895-909.
- [BS 5489-1] British Standards Institution (2003). BS 5489-1:2003 Code of practice for the design of road lighting – Part 1: Lighting of roads and public amenity areas. London: BSI.
- [BS 13201-2] British Standards Institution (2003). BS EN 13201-2 Road lighting – Part 2 : Performance requirements. London: BSI.
- [BULLOUGH 2009] Bullough, J. D.; Skinner, N. P. (2009). Influence of foreground illumination from headlamps on visibility and preference. SAE 2009-01-0336. USA: SAE.
- [CABERLETTI 2010] Caberletti, L.; Kümmel, M.; Schierz, Ch. (2009). Results of an experimental study on driver's perception of ambient vehicle Lighting. Darmstadt. ISAL. pp. 162-170.
- [CARARRO 1985] Cararro, U. (1985). Die Adaptationsleuchtdichte bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern unter besonderer Berücksichtigung einer dynamischen Sehaufgabe. Dresden: Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“. S. 5.
- [CAVANAGH 1987] Cavanagh, P.; MacLeod, D. I.; Anstis, S. M. (1987). Equiluminance: Spatial and temporal factors and the contribution of blue-sensitive cones. In: Optical Society of America A, Optics and Image Science. Vol. 4. pp. 1428-1438.
- [CCBFC 2001] CCBFC 2002 (2002). National building code of Canada. Canadian Commission on Building and Fire Codes.

- [CEN EN 1838] CEN EN-1838 (1999). Lighting applications - emergency lighting. European Committee for Standardization.
- [CIE 1924] CIE (1926). Principales decisions (6e Session, 1924). Cambridge: University Press. pp. 67-69.
- [CIE 1951] CIE (1951). Proceedings. Vol. 1. Sec. 4; Vol 3. Paris: Bureau Central de la CIE. p. 37.
- [CIE 1963] CIE Compte Rendu 12e Session. Vol. B. Stockholm. pp. 37-39.
- [CIE TC 1-20] CIE (1990). CIE 1988: 2° spectral luminous efficiency function for photopic vision. Vienna: CIE Publ. 86.
- [CIE 18] CIE (1970). Principles of light measurement. CIE Publ. 18 E-1.2.
- [CIE 41] CIE (1994). Light as a true visual quantity: principles of measurement. CIE Publ. 41.
- [CIE 75] CIE (1988). Spectral luminous efficiency functions based upon brightness matching for monochromatic point sources, 2° and 10° fields. Vienna: CIE Publ. 75.
- [CIE 78-1988] CIE (1988). Brightness-Luminance-Relations – Classified Bibliography. CIE 78-1988. Vienna: CIE.
- [CIE 141] CIE (2001). Testing of supplementary systems of photometry. CIE Publ. 141. Vienna: CIE.
- [CIE 165] CIE (2005). CIE 10 degree photopic photometric observer. CIE Publ. 165. Vienna: CIE.
- [CIE 191] CIE (2010). Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. CIE Publ. 191. Vienna: CIE.
- [CRAWFORD 1949] Crawford, B. H. (1949). The scotopic visibility function. In: Proceedings of the Physical Society. B62. pp. 321-334.
- [CURCIO 1990] Curcio, C. A.; Sloan, K. R.; Kalina, R. E.; et al. (1990). Human photoreceptor topography. In: Journal of Comparative Neurology. Vol. 292/4. Wiley-Liss Inc. pp. 497-523.
- [CURCIO 1991] Curcio, C. A.; Allen, K. A.; Sloan, K. R.; et al. (1991). Distribution and morphology of human cone photoreceptors stained with anti-blue opsin. In: Journal of Comparative Neurology. Vol. 312/4. pp. 610-624.
- [CVRL] Stockman, A. (2001). Colour & Vision Research Laboratory and Database. Institute of Ophthalmology, University College London. [Online Document] URL: <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/>. (01.08.2010).
- [DARTNAL 1983] Dartnal, H. J. A.; Bowmaker, J. K.; Mollon, J. D. (1983). Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons. In: Proceedings of the Royal Society of London. B 220. pp. 115-130.
- [DERLOFSKE 2005] Derlofske, J. V.; Bullough, J. D.; Watkinson, J. (2005). Spectral Effects of LED forward lighting. Troy: LRC.
- [DERLOFSKE 2007] Derlofske, J. V.; Bullough, J. D.; Gribbin, C. (2007). Comfort and visibility characteristics of spectrally-tuned high intensity discharge forward lighting systems. In: European Journal of Scientific Research. Vol. 17/1. pp. 73-84.
- [DIN5032/7] DIN 5032 Teil 7 (1985). Lichtmessung – Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichtemessgeräten. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- [DIN5033/8] DIN 5033 Teil 8 (1982). Farbmessung – Meßbedingungen für Lichtquellen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN84] DIN 5031 Teil 7 (1984). Benennung der Wellenlängenbereiche. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN EN 13201-2] DIN EN 13201-2 (2004). Straßenbeleuchtung – Teil 2: Gütemerkmale. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DRUM 1983] Drum, B. (1983). Short-wavelength cones contribute to achromatic sensitivity. In: Vision Research. Vol. 23. pp. 1433-1439.
- [ECE 1&2] ECE (1986). Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen der Kategorie R2 ausgerüstet sind. ECE Publ. 1&2.
- [EISNER 1980] Eisener, A.; MacLeod, D. I. (1980). Blue sensitive cones do not contribute to luminance. In: Journal of the Optical Society of America. Vol. 70. pp. 121-123.
- [ELOHOLMA 2004] Eloholma, M.; Ketomäki, J.; Halonen, L. (2004). Luminances and visibility in road lighting – conditions, measurements and analysis. Report 30. Espoo: Helsinki University of Technology.
- [ENDERS 1995] Enders, M. (1995). Vergleich ausgewählter Methoden zur Ermittlung der spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges. Dissertation. Darmstadt: TH Darmstadt.
- [ERB 1975] Erb, W. (1975). Ein Reflexionsnormal für den spektralen Strahldichtefaktor. In: Lichttechnik 27. Jahrgang. Nr. 6. S. 250-253.
- [ESA 2009] European Space Agency (2009). Planck: Dem Urknall ins Auge blicken. [Online Document] URL http://www.esa.int/esaCP/SEM69L0YDUF_Austria_0.html. (13.12.2010).
- [FAIRCHILD 1996] Fairchild, M. D.; Braun, K. M.; Alessi, P. J. (1996). Viewing techniques for cross-media image comparisons. In: Color research and application. Vol. 21/1. pp. 6-17.
- [FEKETE 2005] Fekete, J.; Sik-Lányi, C.; Schanda J. (2005). Night-time driving – new light sources in car headlamps – visibility and glare. CIE Midterm Meeting 2005. Leòn.
- [FOTIOS 1997] Fotios, S. A.; Levermore, G. J. (1997). Perception of electric light sources of different colour properties. In: Lighting Research and Technology. Vol. 29/3. pp. 161-171.
- [FOTIOS 2001A] Fotios, S. A. (2001). Lamp Colour properties and apparent brightness: a review. In: Lighting Research and Technology. Vol. 33/3. pp. 163-181.
- [FOTIOS 2001B] Fotios, S. A. (2001). An error in brightness matching associated with the application of dimming. In: Lighting Research and Technology. Vol. 33/4. pp. 223-231.
- [FOTIOS 2005] Fotios, S. A.; Gado, T. (2005). A Comparison of visual objectives used in side-by-side matching tests. In: Lighting Research and Technology. Vol. 37/2. pp. 117-131.
- [FOTIOS 2007] Fotios, S. A.; Cheal, C. (2007). Evidence for response contraction bias in side-by-side matching tasks. In: Lighting Research and Technology. Vol. 39/2. pp. 159-169.

- [FOTIOS 2008] Fotios, S. A.; Houser, K. W.; Cheal, C. (2008). Counterbalancing needed to avoid bias in side-by-side brightness matching tasks. In: *Leukos*. Vol. 4/4. pp. 207-223.
- [FOTIOS 2009A] Fotios, S. A.; Houser, K. (2009). Tuning lamp spectral power to improve the perception of interior spaces. *Lux Europa 2009*. Istanbul.
- [FOTIOS 2009B] Fotios, S. A.; Cheal, C. (2009). Obstacle detection: A pilot study investigating the effects of lamp type, illuminance and age. In: *Lighting Research and Technology*. Vol. 41. pp. 321-342.
- [FOTIOS 2010A] Fotios, S. A. (2010). Street lighting: A metric for specifying white light. [Online Document] URL <http://gow.epsrc.ac.uk/ViewGrant.aspx?GrantRef=EP/F035624/1>. (10.05.2010).
- [FOTIOS 2010B] Fotios, S. A.; Cheal, C. (2010). A comparison of simultaneous and sequential brightness judgements. In: *Lighting Research and Technology*. Vol. 42. pp. 183-197.
- [FRANZKE 2006] Franzke, D. (2006). Einfluss ambierter Beleuchtung auf das Kontrastsehvermögen. Diplomarbeit. Universität Karlsruhe & FH Jena.
- [FRY 1973] Fry, G. A. (1973). Response of the eye to a flash of light. In: *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry*. Vol. 50. pp. 355-375.
- [FULTON 2009] Foulton, J. T. (2009). Processes in biological vision. [Online Document] URL <http://www.neuronresearch.net/vision/files/signalingblock.htm>. (23.12.2010).
- [GAO 1993] Gao, H.; Hollyfield, J. G. (1993). Cell loss during aging in the human retina. In: Lütjen-Drecole, E.; Rohen, J. W. (eds.). *Basic Aspects of Glaucoma Research III*. Stuttgart: Schattauer Verlag GmbH. pp. 163-166.
- [GALL 1993] Gall, D. (1983). Die Kontrastempfindung als Ausgangspunkt für die Beleuchtungsplanung. Dissertation. Ilmenau: TH Ilmenau.
- [GALL 2004] Gall, D. (2004). *Grundlagen der Lichttechnik – Kompendium*. 2. Auflage. München: Richard Pflaum Verlag GmbH.
- [GOLDSTEIN 2008] Goldstein, E. B. (2008). *Wahrnehmungspsychologie*. 7. Auflage. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- [GOTTSCHALK 2007] Gottschalk, M. (2007). Das Hellempfinden im mesopischen Bereich in Abhängigkeit vom Farbbort. Diplomarbeit. Paderborn: L-LAB.
- [GRIMM 2003] Grimm, M. (2003). Anforderungen an eine ambiente Innenraumbeleuchtung von Kraftfahrzeugen. München: Herbert Utz Verlag GmbH.
- [GRIMM 2010] Grimm, M. (2010). Trends in automotive lighting, new technology and its benefits for end-users. Darmstadt: ISAL. pp. 336-341.
- [GUPTA 1995] Gupta, M. M.; Knopf, G. K. (ed.). (1995). *Neuro-Vision Systems: Principles and applications*. IEEE Press. p.4.
- [HALONEN 2005] Halonen, L.; Orreveläinen, P.; Viikari, M. (2005). Make way for peripheral $V(\lambda)$. In: *Light and Engineering*. Vol. 13/3. pp. 23-34.
- [HAMM 1997] Hamm, M. (1997). Untersuchungen der spektralen Schwellenempfindlichkeit und der Reizverarbeitung im menschlichen Auge. Dissertation. Darmstadt: TH Darmstadt.

- [HARTGE 1991] Hartge, J. E. (1991). Untersuchungen zur spektralen Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges bei kleinen Lichtquellen. Dissertation. Darmstadt: TH Darmstadt.
- [HENTSCHEL 2002] Hentschel, H. J. (2002). Licht und Beleuchtung: Grundlagen der Lichttechnik. 5. Auflage. Heidelberg: Hüthig Verlag.
- [HOUGH 1969] Hough, E. A.; Ruddock K. H. (1996). The parafoveal visual response of a tritanope and an interaction of the V_{λ} sensitivity functions of mesopic vision. In: Vision Research. Vol. 9. pp 935-946.
- [HOUSER 2009] Houser, K.W.; Fotios, S. A.; Royer, M. P. (2009). A test of the S/P ratio as a correlate for brightness perception using rapid-sequential and side-by-side experimental protocols. In: Leukos. Vol. 6/2. pp. 119-137.
- [HURVICH 1953A] Hurvich, M. L.; Jameson, D. (1953). Spectral sensitivity of the fovea. I. Neutral adaptation. In: Journal of the Optical Society of America. Vol. 43/6. pp. 485-494.
- [HURVICH 1953B] Hurvich, M. L.; Jameson, D. (1953). Spectral sensitivity of the fovea. II. Dependence on chromatic adaptation. In: Journal of the Optical Society of America. Vol. 43/7. pp. 552-559.
- [IESNA 2000] IESNA (2000). The Illuminating Engineering Society of North America: Lighting handbook, reference & application. New York: IESNA.
- [IESNA RP-8-00] IESNA (2005). Recommended practice RP-8-00 roadway lighting. New York: IESNA.
- [IKEDA 1992] Ikeda, M.; Ikeda, J.; Ayama, M. (1992). Specification of individual variation in luminous efficiency for brightness. In: Color Research and Application. Vol. 17/1. pp. 31-44.
- [INGLING 1977] Ingling, C. R. Jr.; Huong-Peng-Tsou, B. (1977). Orthogonal combination of the three visual channels. In: Vision Research. Vol. 17. pp. 1075-1082.
- [IPP 1999] Ipp, E. (1999). Daten- und Videoprojektoren. [Online Document] URL <http://www.science-vision.at/dataprojectors.html>. (02.02.2011).
- [IRIDOLOGY 1982] Deckert, C. (2010). Human retina diagram for perspective of rods and cones. Original : Iridology Vol. 2. (1982). Escondido : Jensen Enterprises. pp. 136. [Online Document] URL <http://www.eyedesignbook.com/ch3/fig3-60retinadiag3BIG.jpg>. (16.12.2010).
- [ISHIHARA 2002] Ishihara, S. (2002). Ishihara's tests for colour deficiency – 24 plates edition. Japan: Kanehara Trading Inc.
- [JACKEL 2006] Jackel, F.; Wichmann, F. A. (2006). Spatial four-alternative forced choice method is the preferred psychophysical method for naive observers. In: Journal of Vision. Vol. 6. pp. 1307-1322.
- [JACKMAN 2011] Jackman, S. L.; Babai, N.; Chambers, J.J.; et al. (2011). A positive feedback synapse from retinal horizontal cells to cone photoreceptors. In: PLoS Biology. Vol. 9/5. pp.1-15.
- [JAINSKI 1938] Jainski, P. (1938). Die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges und ihre Bedeutung für die Lichtmesstechnik. Dissertation. Berlin: TH Berlin.
- [JAMESON 1972] Jameson, D.; Hurvich, L. M. (1972). Visual psychophysics. In: Handbook of Sensory Physiology. Vol. 7/4. New York: Springer Verlag.

- [JRA 2007] JRA (2007). Road lighting installation standard 2007. Tokyo: JRA.
- [JUNG 1970] Jung, R.; Spillmann, L. (1970). Perceptive field estimation and perceptual integration in human vision. In: Early experience and visual information processing in perceptual and reading disorders. Proceedings of Conference 1968. Committee on Brain Sciences, Division of Medical Sciences. Washington: National Academy of Sciences. pp. 118-197.
- [JÜLICH 2004] Forschungszentrum Jülich, ISB (2004). Photoreceptor cells. [Online Document] URL <http://www.fz-juelich.de/isb/isb-1/Photoreception>. (20.12.2010).
- [KANU 2001] Kanu, H.; Jägle, H.; Sharpe, L. T. (2001). L/M cone ratio as a function of retinal eccentricity. In: Color Research and Application. Vol. 26. pp. 128-132.
- [KHANH 2004] Khanh, T. Q. (2004). Lichttechnische Einflussfaktoren auf die visuelle Wahrnehmung und den menschlichen Biorhythmus. In: Licht 10/2004. pp. 980-985.
- [KHANH 2004] Khanh, T. Q. (2004). Physiologische und psychologische Aspekte in der Photometrie, Colorimetrie und in der Farbbildverarbeitung. Ilmenau: TU-Ilmenau. Habilitation.
- [KHANH 2005] Khanh, T. Q. (2005). Über Helligkeit farbiger Objekte unter einem großen Sehfeld - Berechnungsmodelle, visuelle Tests. In: Licht 2005. Ausgabe 7/8. S. 624-628.
- [KHANH 2008A] Khanh, T. Q.; Schiller, C. (2008). Forschung und Innovation für eine energieeffiziente und physiologieorientierte Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik. Licht 2008. Ilmenau.
- [KHANH 2008B] Khanh, T. Q.; Böll, M.; Schiller, C.; et al. (2008). Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung im mesopischen Bereich. In: Licht 2008. Ausgabe 3. S. 214-219.
- [KHANH 2009] Khanh, T. Q. (2009). 85 Jahre $V(\lambda)$ -Lichttechnik. In: Licht. Ausgabe 7-8/2009. S. 520-529.
- [KINNEY 1964] Kinney, J. A. S. (1964). Effect of field size and position on mesopic spectral sensitivity. In: Journal of the Optical Society of America. Vol. 54. pp. 671-677.
- [KITTNER 1994] Kittner, I.; Wegscheider, S.; Pirkner, P. (1994). Allgemeine Psychologie – Experimentalpsychologische Grundlagen. 2. Auflage. Wien: WUV Universitätsverlag.
- [KLEINKES 2003] Kleinkes, M. (2003). Objektivierete Bewertung des Güteprinzips Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen. Dissertation. Bielefeld: Universität Bielefeld.
- [KLEY 2007] Kley, F.; Gottschalk, M.; Kliebisch, D.; et al. (2007). Ein Helligkeitsvergleich verschiedener Lichtquellen im mesopischen Bereich. In: Licht 2007. Ausgabe 7/8.
- [KNOLL 2005] Knoll, B. (2005). Realisierbarkeit eines Nachtsichtsystems mit Hilfe pulsweitenmodulierter LED-Scheinwerfer. Diplomarbeit. Paderborn: L-LAB.
- [KOKOSCHKA 1972] Kokoschka, S. (1972). Untersuchungen zur mesopischen Strahlungsbeurteilung. In: Die Farbe. Band 1. S. 39-112.

- [KOKOSCHKA 1980] Kokoschka, S. (1980). Photometrie niedriger Leuchtdichten durch eine äquivalente Leuchtdichte des 10° - Feldes. In: Licht-Forschung 2. Nr. 1. S. 1-13.
- [KOKOSCHKA 1985] Kokoschka, S.; Adrian, W. (1985). Influence of the field size on the spectral sensitivity of the eye in the photopic and mesopic range. In: American Journal of Optometry and Physiological Optics. Vol. 62/2. pp. 119-126.
- [KOKOSCHKA 2003] Kokoschka, S. (2003). Grundlagen der Lichttechnik. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- [KOLB 2003] Kolb, H. (2003). How the retina works. In: American Scientist. Vol. 91. The Scientific Research Society. pp. 29-35.
- [KÖHLER 2008] Köhler, S. (2008). Helligkeitsbewertung von Kfz-Scheinwerfern unter mesopischen Bedingungen. Diplomarbeit. Paderborn: L-LAB.
- [KRAFT 1993] Kraft, T. W.; Schneeweis, D. M.; Schnapf, J. L. (1993). Visual transduction in human rod photoreceptors. In: Journal of Physiology. Vol. 464. pp. 747-765.
- [KUBENA 2009] Kubena, V.; Kratochvil, J.; Popelek, J. (2009). Can the color temperature beat the collected luminous flux?. ISAL 2009. Darmstadt. pp. 456-462.
- [KURTENBACH 1999] Kurtenbach, A.; Meierkord, S.; Kremers, J. (1999). Spectral sensitivity in dichromats and trichromats at mesopic illuminances. In: Journal of the Optical Society of America. Vol. 16. pp. 1541-1548.
- [LACHENMAYR 1997] Lachenmayr, B.; Buser, A.; Egerer, J. (1997). Blendung durch Xenon-Gasentladungsscheinwerfer physiologisch oder psychologisch? 95. Jahrestagung der dt. Ophthalmologischen Gesellschaft. Berlin.
- [LACHMAYR 2006] Lachmayr, B. (2006). Gesichtsfeld und Verkehr – Wie funktioniert das periphere Sehen? In: Ophthalmologe. Vol.103. S. 373-381.
- [LEE 1989] Lee, J.; Stromeyer, C. F. (1989). Contribution of human short-wave cones to luminance and motion detection. In: Journal of Physiology. Vol. 413. pp. 563-593.
- [LERMANN 1980] Lermann, S. (1980). Human ultraviolet radiation cataracts. In: Ophthalmic Research. Vol. 21. pp. 303-314.
- [LERMAN 1988] Lerman, S. (1988). Human lens simultaneous aging index. In: Lens Research. Vol.5. pp. 23-31.
- [LEWIS 1999] Lewis, A. L. (1999). Visual performance as a function of spectral power distribution of light sources at luminances used for general outdoor lighting. In: Journal of the Illuminating Engineering Society. Vol. 28/1. pp. 37-42.
- [LINGELBACH 2002] Lingelbach, B.; Ehrenstein, W. H. (2002). Das Hermann-Gitter und die Folgen. In: Physiologische Optik. DOZ 5/2002. S. 14-20.
- [LOCHER 2009] Locher, J.; Kley, F. (2009). Disability and discomfort glare of headlamps. ISAL 2009. Darmstadt. S. 38-42.
- [MERBS 1992A] Merbs, S. L.; Nathans, J. (1992). Absorption spectra of the hybrid pigments responsible for anomalous color vision. In: Science. Vol. 258. pp. 464-466.

- [MERBS 1992B] Merbs, S. L.; Nathans, J. (1992). Photobleaching difference absorption spectra of human cone pigments: quantitative analysis and comparison to other methods. In: *Photochemistry and Photobiology*. Vol. 56. pp. 869-881.
- [METHLING 1996] Methling, D. (1996). *Bestimmen von Sehhilfen*. Stuttgart: Enke Verlag.
- [MINODA 2007] Minoda, K. T.; Kojima, S.; Fujita, Y.; et al. (2007). Study on glare lamp and individual variations of brightness perception. Darmstadt: ISAL 2007. pp. 410-417.
- [MIZOKAMI 2006] Mizokami, Y.; Werner, S. J.; Crognale, M. A.; et al. (2006). Nonlinearities in color coding: compensating color appearance for the eye's spectral sensitivity. In: *Journal of Vision*. Vol. 6. pp. 996-1007.
- [MOULDER 2005] Moulder, M.; Boyce, P. R. (2005). Spectral effects in escape route lighting. In: *Lighting Research and Technology*. Vol 37/7. pp. 199-218.
- [NAKANO 1999] Nakano, Y.; Yamada, K.; Suehara, K.; et al. (1999). A simple formula to calculate brightness equivalent luminance. In: *Proceedings of the CIE 24th Session*. Pp. 33-37.
- [NEITZ 1991] Neitz, M.; Neitz, J.; Jacobs, G. H. (1991). Spectral tuning of pigments underlying red-green colour vision. In: *Science*. Vol. 252. pp. 971-974.
- [NEITZ 1998] Neitz, M.; Kraft, T. W.; Neitz, J. (1998). Expression of L-cone pigment gene subtypes in female. In: *Vision Research*. Vol. 38. pp. 3221-3225.
- [NFPA 2002] NFPA 101-2002 (2002). 101 Life safety code. National Fire Protection Association.
- [NIKOLAUS 1980] Nikolaus (1980). *Herstellung des Innenbelags von Photometerkugeln*. Braunschweig: PTB, Lab 4.12.
- [OKAWA 2009] Okawa, M.; Kobayashi, S.; Okajima, K. (2009). Study on the effect of light source spectrum on apparent road surface brightness. ISAL 2009. Darmstadt. pp. 53-64.
- [OL 490] Optronic Laboratories (2008). OL 490 Agile Light Source Manual. No. M000325, Revision B. Orlando: Optronic Laboratories.
- [OMIKRON 2010] Omikron (2010). Rods and cones in retina. [Online Document] URL http://www.sciencephoto.com/images/download_wm_image.html/P424223-Rods_and_cones_in_retina-SPL.jpg?id=804240223. (20.12.2010).
- [OSTERBERG 1935] Osterberg, G. (1935). Topography of the layer of rods and cones in the human retina. In: *Acta Ophthalmologica*. Vol. 6. pp. 1-103.
- [OUELLETTE 1993] Ouellette, M. J.; Tansley, B. W.; Pasini, I. (1993). The dilemma of emergency lighting: theory vs. reality. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society*. Vol. 22. pp. 113-121.
- [PALMER 1966] Palmer, D. A. (1966). A system of mesopic photometry. In: *Nature*. Vol. 209. pp. 276-281.
- [PALMER 1985] Palmer, D. A. (1985). Visibility curves by direct comparison in a 10° field at 1000 Td. In: *Journal of the Optical Society of America*. Vol. A2. pp. 578-583.
- [PALMER 2002] Palmer S. E. (2002). *Vision science – photons to phenomenology*. 3rd Edition. Cambridge: MIT-Press. p. 112.

- [POLSTER 2010] Polster, S. (2010). Persönliches Gespräch. Licht 2010. Wien.
- [PURKINJE 1825] Purkinje, J. E. (1825). Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne. Zweites Bändchen. Berlin: G. Rainer. S. 118-119.
- [RAPHAEL 2010] Raphael, S. (2010). Characterization of mesopic vision for luminance photometry. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn.
- [RANSOM 1980] Ransom-Hogg, A.; Spillmann, L. (1980). Perceptive field size in fovea and periphery of the light- and dark- adapted retina. In: Vision Research. Vol. 20. pp. 221-228.
- [REA 2004] Rea, M. S.; Bullough, J. D.; Freyssinier-Nova, J. P.; et al. (2007). A proposed unified system of photometry. In: Lighting Research and Technology. Vol. 36/2. pp. 85-111.
- [REA 2010] Rea, M. S.; Radetsky, L. C.; Bullough, J. D. (2010). Toward a model of outdoor lighting scene brightness. In: Lighting Research and Technology. Published online before print. June 2010.
- [REEB 1962] Reeb, O. (1962). Grundlagen der Photometrie. Karlsruhe: G-Braun Verlag.
- [RICHARD 1961] Richard, G. D.; Ross, A. (1961). Dark adaptation threshold, rate and individual prediction. In: Highway Research Board No. 298. National Academy of Sciences – National Research Council. Vol. 925. pp. 3-17.
- [RICHTER 1980] Richter, M. (1980). Einführung in die Farbmeterik. 2. Auflage. Walter de Gruyter & Co.: Berlin/New York. S. 34-38.
- [RIPAMONTI 2009] Ripamonti, C.; Stockman, A.; Crowther, E.; et al. (2009). The S-cone contribution to luminance depends on the M- and L-cone adaptation level: silent surrounds?. In: Journal of Vision. Vol. 9/3. pp. 1-16.
- [RODDEWIG 1983] Roddewig, W. (1983). Die Readaptationszeit – ihre Messung und Anwendung. Teil 1. In: Licht-Forschung 5. Nr. 2. S. 105-112.
- [SAGAWA 1995] Sagawa, K. (1995). 70 years of CIE photometry. In: CIE x009-1995. pp. 1-6.
- [SAGAWA 2002] Sagawa, K. (2002). Visual functions of older people and visibility of traffic signs. In: Gerontology. Vol. 1 /4. pp. 296-299.
- [SAGAWA 2005] Sagawa, K. (2005). Brightness in mesopic vision and the CIE supplementary system of photometry. CIE Symposium "Vision and lighting in mesopic conditions". León. pp. 20-25.
- [SAGAWA 2006] Sagawa, K. (2006). Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any level including mesopic vision. In: Ophthalmic and Physiological Optics. Vol. 26. pp. 240-245.
- [SAGAWA 2007] Sagawa, K. (2007). CIE supplementary System of photometry: Photometry for brightness at any level. Meeting CIE TC1-58. Eindhoven.
- [SAUTER 2005] Sauter, G. (2005). Lichtstärke – Die SI-Basiseinheit „Candela“. In: Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB. Sonderdruck H08151. Bremerhaven: Wissenschaftsverlag NW. S. 50-56.
- [SCHANDA 1998] Schanda, J. D. (1998). Future trends in photometry. In: DeCusatis, C. (ed.). Handbook of Applied Photometry. New York: Optical Society of America & Springer Verlag New York Inc. pp. 413-422.
- [SCHANDA 2010] Schanda, J. (2010). Persönliches Gespräch zur Verwendung der „cone fundamentals“. Licht 2010. Wien.

- [SCHÄFER 2010A] Schäfer, S.; Völker, S.; Köth, K. (2010). Betrachtung der Energieeffizienz breitbandiger spektraler Verteilungen von Lichtquellen im mesopischen Bereich und deren Helligkeitseindruck. Licht 2010. Wien.
- [SCHÄFER 2010B] Schäfer, S. (2010). Twilight zone and brightness perception – New research results. 2nd CIE Expert Symposium on Appearance. Ghent.
- [SCHIEBER 1995] Schieber, F. (1995). Effects of visual aging upon driving performance. In: Adrian, W. (ed.). Lighting for Aging Vision and Health. Proceedings of the 3rd International Symposium. Orlando: Lighting Research Institute Inc. pp. 113-127.
- [SCHIERZ 2007] Schierz, C. (2007). Wie wird die Leuchtdichte subjektiv als Helligkeit wahrgenommen? Dörfeld: Lux Junior.
- [SCHIERZ 2008] Schierz, C. (2008). Licht für die ältere Bevölkerung – Physiologische Grundlagen und ihre Konsequenzen. Licht 2008. Ilmenau.
- [SCHIERZ 2010] Schierz, C. (2010). Physio-/psychologische Wirkung von Lichtfarben. TU-Ilmenau. S. 1-8.
- [SCHILLER 2007] Schiller, C.; Khanh, T. Q. (2007). First field tests of cars with completely built-in LED headlamps under realistic driving conditions. ISAL 2007. Darmstadt.
- [SCHILLER 2010] Schiller, C.; Böll, M.; Khanh, T. Q. (2010). Wirkung von Lampenspektren auf die Detektion von Fahrbahnmarkierungen bei Nacht. Licht 2010. Wien.
- [SCHMIDT 2006] Schmidt, S. (2006). Der Einfluss der Lichtfarbe auf Blendung und Erkennbarkeit am Beispiel von LED-Frontscheinwerfern. Diplomarbeit. Paderborn: L-LAB.
- [SCHMIDT 2006] Schmidt, F.; Schaible, G. (2006). Neuro- und Sinnesphysiologie. 5. Auflage. Heidelberg: Springer Medizin Verlag. S. 250 ff.
- [SCHMIDT 2007] Schmidt, R. F. (ed.); Lang, F. (ed.); Thews, G. (2007). Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie. 30. Auflage. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- [S.-CLAUSEN 1992] Schmidt-Clausen, H. J.; Damasky, J.; Wambganß, H. (1992). Einfluss der Helligkeit von Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei Nacht. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft: 629. Bonn-Bad Godesberg: Bundesministerium für Verkehr.
- [S.-CLAUSEN 2001] Schmidt-Clausen, H. J.; Schwenkschuster, L. (2001). Einfluss der Helligkeit und des Reflexionsverhaltens von nassen Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 812. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. S. 29 ff.
- [SCHNAPF 1987] Schnapf, J. L.; Kraft, T. W.; Baylor, D. A. (1987). Spectral sensitivity of human cone photoreceptors. In: Nature. Vol. 325. pp. 439-441.
- [SCHNEEWEIS 1995] Schneeweis, D. M.; Schnapf, J. L. (1995). Photovoltage of rods and cones in the macaque retina. In: Science. Vol. 268. pp. 1053-1055.
- [SEDLMEIER 2008] Sedlmeier, P.; Renkewitz, F. (2008). Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie. München: Pearson Studium. S. 453.
- [SHARPE 1993] Sharpe, L. T.; Fach, C. C.; Stockman, A. (1993). The spectral properties of the two rod pathways. In: Vision Research. Vol. 33/18. pp. 2705-2720.

- [SHARPE 1989] Sharpe, L. T.; Stockman, A.; McLeod D. I. A. (1989). Rod flicker perception: Scotopic duality phase lags and destructive interference. In: Vision Research. Vol. 29. pp. 1539-1559.
- [SHARPE 1999] Sharpe, L. T. (ed.); Stockman, A.; Jägle, H.; et al. (1999). Opsin genes, cone photopigments, color vision and color blindness. In: Gegenfurtner, K. R. (ed.). Color Vision: From genes to Perception. Cambridge: Cambridge University Press. pp. 3-52.
- [SHARPE 2005] Sharpe, L. T.; Stockman, A.; Jagla, W.; et al. (2005). A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for a daylight adaptation. In: Journal of Vision. Vol. 5. pp. 948-968.
- [SNYDER 1973] Snyder, A. W.; Pask, C. (1973). The Stiles-Crawford-Effect – explanation and consequences. In: Vision Research. Vol. 13. pp. 1115-1137.
- [SPERLING 1980] Sperling, H. G. (1980). Blue receptor distribution in primates from intense light in histochemic studies. In: Verriest, G. (ed.). Colour Vision Deficiencies. Vol. 5. pp. 30-45.
- [SPILLMAN 1963] Spillmann, L. (1963). Zur Feldorganisation der visuellen Wahrnehmung beim Menschen: Vergleichende psychophysikalische Untersuchungen der Größe rezeptiver Felder im zentralen und peripheren Gesichtsfeld mit Simultankontrast, Filmmfusion, Scheinbewegung und Blickverfolgung. Dissertation. Westfälische Wilhelms-Universität zu Münster.
- [SPILLMAN 1971] Spillmann, L. (1971). Foveal perceptive fields in the human visual system measured with simultaneous contrast in grids and bars. In: Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie. Vol. 326. pp. 281-291.
- [SPILLMANN 1972] Spillmann, L.; Conlon, J. E. (1972). Photochromatic interval during dark adaptation as a function of background luminance. In: Journal of the optical Society of America. Vol. 62. pp. 182-185.
- [STERLING 2003] Sterling, P. (2003). How retinal circuits optimize the transfer of visual information. In: Chalupa, L. M.; Werner, J. S. (ed.). The visual neurosciences. Cambridge: MIT Press. pp. 234-259.
- [STILES 1959] Stiles, W. S.; Burch, J. M. (1959). NPL colour-matching investigation: final report. In: Optica Acta. Vol. 6. pp.1-26.
- [STILES 1961] Stiles, W. S. (1961). Adaptation, chromatic adaptation, colour transformation. In : Anales de la Real Sociedad Espaniola de Fisica y Quimica. Vol. 57. pp. 149-175.
- [STOCKMAN 1987] Stockman, A.; MacLeod, D. I.; DePriest, D. D. (1987). An inverted S-cone input to luminance channel: Evidence for two processes in S-cone flicker detection. In: Investigative Ophthalmology & Visual Science. Vol. 28.
- [STOCKMAN 1991] Stockman, A.; Sharpe, L. T.; Zrenner, E.; et al. (1991). Slow and fast pathways in the human rod visual system: ERG and psychophysics. In: Journal of the Optical Society of America A. Vol. 8. pp.1657-1665.
- [STOCKMAN 1991] Stockman, A.; MacLeod, D. I.; DePriest, D. D. (1987). The temporal properties of the human short-wave photoreceptors and their associated pathways. In: Vision Research. Vol. 31. pp. 189-208.
- [STOCKMAN 1999] Stockman, A.; Sharpe, L. T.; Fach, C. C. (1999). The spectral sensitivity of the human short-wavelength cones. In: Vision Research. Vol. 39. pp. 2901-2927.

- [STOCKMAN 2000] Stockman, A.; Sharpe, L. T. (2000). Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. In: *Vision Research*. Vol. 40. pp. 1711-1737.
- [STOCKMAN 2006] Stockman, A.; Sharpe, L. T. (2006). Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency. In: *Ophthalmic Physiological Optics*. Vol. 26. pp. 225-239.
- [STÖLDT 2003] Stöldt, I. (2003). Prinzipien der Bildverarbeitung im visuellen System des Menschen. In: *Proseminar Computer Vision*. Universität Ulm.
- [SULLIVAN 2001] Sullivan, J. M. ; Flannagan, M. J. (2001). Visual effects of blue-tinted tungsten-halogen headlamp bulbs. In: *UMTRI Report 2001-9*. Michigan: University of Michigan.
- [SZALMAS 2006] Szalmas, A. Bodrogi, P. Sik-Lanyi, C. (2006). Characterizing luminous efficiency functions for a simulated mesopic night driving task based on reaction times. In: *Ophthalmic and Physiological Optics*. Vol. 26. pp. 281-287.
- [TAYLOR 1988] Taylor, J. R. (1988). Fehleranalyse – Eine Einführung in die Untersuchung von Unsicherheiten in physikalischen Messungen. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH. 1. Auflage. S. 77.
- [TOPALIS 2010] Topalis, F. V.; Polymeropoulos, G. (2010). Mesopic spectral sensitivity curves by a colour-matching method. In: *Lighting Research and Technology*. Vol. 42/2. pp. 199-214.
- [TI 2005] Texas Instruments (2005). DMD 0.7 XGA 12° LVDS Discovery – Product Perview TI DN 2506779. Research Statement.
- [TREZONA 1970] Trezona, P. W. (1970). Rod participation in the ‘blue’ mechanism and color constancy. In: *Vision Research*. Vol. 10. pp. 318-332.
- [TREZONA 2000] Trezona, P.W. (2000). Luminance: Its use and misuse. In: *Color Research and Application*. Vol. 25/2. pp. 145-147.
- [TREZONA 2001] Trezona, P. W. (2001). Mesopic photometry (TC1.21) minority report. In: *CIE 141-2001*. Vienna: CIE. pp. 60-63.
- [UCHIKAWA 1986] Uchikawa, K.; Ikeda, M. (1986). Accuracy of memory for brightness of colored lights measured with successive comparison method. In: *Journal of the Optical Society of America A*. Vol. 3. pp. 34-39.
- [VERDON 1987] Verdon, W.; Adams, A. J. (1987). Short-wavelength sensitive cones do not contribute to mesopic luminosity. In: *Journal of the Optical Society of America A, Optics and Image Science*. Vol. 4. pp. 91-95.
- [VIENOT 1992] Vienot, F.; Choron, A. (1991). Brightness matching and flicker photometric data obtained over the full mesopic range. In: *Vision Research*. Vol. 32/3. pp. 533-540.
- [VIKARI 2005] Viikari, M; Eloholma, M; Halonen, L. (2005). 80 years of $V(\lambda)$ use: a review. In: *Light & Engineering*. Vol. 13/4. pp. 24-36.
- [VISTEC R22] Vistec R22. Gebrauchsanweisung R20, R21, R22. Olching: Vistec Vision Technologies.

- [VÖLKER 2006] Völker, S. (2006). Hell- und Kontrastempfinden – ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern. Habilitation. Paderborn: Universität Paderborn.
- [WAGNER 1965] Wagener, G; Boynton, R. M. (1965). Comparison of four methods of heterochromatic photometry. In: Journal of the Optical Society of America. Vol. 62. pp. 1508-1515.
- [WEALE 1959] Weale, R. A.; Said, F. S. (1959). The variation with age of the spectral transmissivity of the living human crystalline lens. In: Gerontologia. Vol. 3. pp. 213-231.
- [WEALE 1995] Weale, R. A. (1995). Aging and senescence of the human eye-lens. In: Adrian, W. (ed.). Lighting for Aging Vision and Health. Proceedings of the 3rd International Symposium. Orlando: Lighting Research Institute Inc. pp. 1-10.
- [WILLIAMS 1983] Williams, T. D. (1983). Aging and central visual field area. In: American Journal of Optometry and Physiological Optics. Vol. 60. pp. 888-891.
- [WILSON 1970] Wilson, M. E. (1970). Invariant features of spatial summation with changing locus in the visual field. In: The Journal of Physiology. Vol. 207/3. pp. 611-622.
- [WYSZECKI 1982] Wyszecki, G.; Stiles, W.S. (1982). Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience Publication. pp. 410 ff & 256 ff.
- [YAGUCHI 1993] Yaguchi, H.; Kawada, A.; Shioiri, S.; et al. (1993). Individual differences of the contribution of chromatic channels to brightness. In: Journal of Optical Society of America A. Vol. 10/6. pp. 1373-1379.
- [TITELBILD] Sinn-Hanlon, J.; Eisenmann, S. (2009). Rods and cones. [Online Document] URL: <http://www.itg.uiuc.edu/exhibits/iotw/2009-01-13/>. (02.02.2011).

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

A, C	Normlichtart A, C	FP	Ficker Photometry
AII	Amakrinzellen	F	F-Wert
AMD	altersabhängige Makuladegeneration	GUI	Graphic User Interface
BaSO ₄	Bariumsulfat	H7	Halogenlampe, Kraftfahrzeug
BS	Bewertungssystem	Ha	Halogen
BSI	British Standards Institution	HCBM, HBM	Heterochromatic Brightness Matching
CCBFC	Canadian Commission on Building & Fire Codes	HFP	Heterochromatic Flicker Photometry
CCT	Correlated Colour Temperature in Kelvin [K]	HgAr	Quecksilber-Argon
CEN	European Committee for Standardization	HID	High Intensity Discharge
CFL	Kompaktleuchtstofflampe	HPS	Hochdruck-Natriumdampflampe
CIE	Internationale Beleuchtungskommission	HQL	Quecksilberdampf-Hochdrucklampe
CF	Cone Fundamentals	HWB	Halbwertsbreite
CMF	Colour Matching Functions	I.E.S.	Illuminating Engineering Society
CPO	Cosmopolisgasentladungslampe	IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
CRI	Colour Rendering Index	JRA	Japan Road Association
CRT	Cathode Ray Tube	LED	Light Emitting Diode
CS	Command Set	LGN	Nucleus Geniculatus Lateralis
CV	Coefficient of Variation	L-LAB	Grundlagenlabor Licht
D65	Normlichtart D65	LMK	Leuchtdichtemesskamera
D2R	Gasentladungslampe (Xenon), Reflektor	LMT	Lichtmesstechnik
DBM	Direct Brightness Matching	M	Matrix
DIN	Deutsches Institut für Normung	m	männlich
DMD	Digital Micromirror Device	MBM	Memory Brightness Matching
dpt	Dioptrie		
df	Freiheitsgrad		

MDB	Minimal Distinct Border	SDK	Software Development Kit
MH	Metalldampf-Halogenlampe		
MM	Minimal Motion	SI	Internationales Einheitensystem
MW	Mittelwert	SML	short, middel, long sensitive cones, rezeptorbasierte spektrale Empfindlichkeitsfunktionen
NA	Numerische Apertur	$s(\lambda)$, $m(\lambda)$, $l(\lambda)$	
NAV	Natriumhochdruck-Dampflampe	SPSS	Statistikprogramm
NCT	Null Condition Test	SRAM	Static Random Access Memory
NFPA	National Fire Protection Association	TC	Technical Committee
OL	Optronic Laboratories	UV	ultraviolet
OL 490	Agile Light Source		
OL 770	Spektroradiometer	VP	Versuchsperson
OLED	Organic Light Emitting Diode		
p	Signifikanzwert	WF	Wichtungsfaktor
P	photopisch	w	weiblich
P9K2	kurzwellig dominantes Spektrum ("Schlumpf")	Xe	Xenon
P-, K-, M-Zellen; Kanal	parvozellulär, koniozellulär, mangozellulär	ZEF	Zapfenempfindlichkeitsfunktion
PTB	Physikalisch Technische Bundesprüfanstalt		
P1-P4	Messpunkte	a, b, c, d	Symbole Wichtungsfaktoren der rezeptorbasierten Anteile
RB	Ribbonzelle	c_0	Lichtgeschwindigkeit in m/s
R, G, B, Y	red, green, blue, yellow	d	Durchmesser
ROI	Region of Interest	E	Beleuchtungsstärke in lx
RSME	Root Squared Mean Error	E_{ret}	retinale Beleuchtungsstärke in lx (Td: Troland)
RPE	retinales Pigmentepithel		
S	skotopisch	f	Frequenz in Hz
SBBM	Successive Binocular Brightness Matching	f_{ges}	Gesamtfehlerwert
SD	Standard Deviation	f1-f8	Faktoren zur Polynomrechnung

H	Hellempfindung	T_{ra}	Readaptationszeit
I_v	Lichtstärke in cd	$V(\lambda)$	spektrale Empfindlichkeitsfunktion eines 2° Normalbeobachters
k_{25}	Altersfaktor	$V'(\lambda)$	skotopische, spektrale Empfindlichkeitsfunktion
k, g	Wichtungsfaktoren	$V^*(\lambda); V_2^*(\lambda); V_{10}^*(\lambda)$	photopische, spektrale Empfindlichkeitsfunktion (SHARPE ET AL. 2005)
K_0, K_m	photometrisches Strahlungsäquivalent in lm/W	$V_{B2}(\lambda); V_{B10}(\lambda)$	photopische, spektrale Empfindlichkeitsfunktion (CIE 75)
$K'm$	scotopisches Strahlungsäquivalent in lm/W	V_{eq}	äquivalentes Leuchtdichteverhältnis
L	Leuchtdichte in cd/m ² (L: Lambert; asb: Apostilib)	$V_M(\lambda)$	Photopische, spektrale Empfindlichkeitsfunktion (JUDD&VOSS korrigiert)
L'	scotopische Leuchtdichte in cd/m ²	$V_{per}(\lambda)$	periphere, photopische, spektrale Empfindlichkeitsfunktion
L_R	rezeptorbasierte Leuchtdichte in cd/m ²	$V_{per}(\lambda)$	wahrnehmungspsychologisch angepasste spektrale Empfindlichkeitsfunktionen
L_{ad}	adaptationsleuchtdichte in cd/m ²	$V_{K64}(\lambda)$	Photopische, spektrale Empfindlichkeitsfunktion (KOKOSCHKA ET AL. 1985)
L_{eq}	äquivalente Leuchtdichte in cd/m ²	ν_0	Frequenz einer monochromatischen Strahlung in Hertz
L_{seq}	systemäquivalente Leuchtdichte in cd/m ²	$VQ(\lambda)$	äquivalente Vergleichsstrahlung
M_e	emittierte Strahlung	$w_{vis/age}$	altersabhängige Wichtung
Q_e	Strahlungsenergie in J	x, y, z	Normspektralwertanteile
n_0	Brechzahl	X, Y, Z	Normspektralwerte
n	Probandenanzahl	x_{emp}	empirischer Wert
r	Korrelationswert	$x_{Schätzer}$	berechneter Wert
R^2	Bestimmtheitsmaß	$y_{10}(\lambda)$	10° basierte Normspektralwertfunktion
$R(\lambda)$	spektrale Rezeptorempfindlichkeitsfunktion	α	Winkel in °
s	Abstand	$\alpha_{ser}; \alpha_{ala}$	L-Zapfenbasierter Wichtungsfaktor (Alanin, Serin)
$S(\lambda)$	spektrale Strahlungsgröße		
t	Zeit in Sekunden; Minuten		
T	Farbtemperatur in K		
T_n	ähnl. Farbtemperatur in K		

$\beta(\lambda)_{d/0}$	spektraler Strahldichtefaktor	H	Homogenität
γ	Winkel zur Flächennormale in °	S	Spektrum
δ	Größe der Unsicherheit	GS	gesamt
ε_p	Winkel zur Abstrahlrichtung der Flächennormale (projiziert)	λ	Wellenlänge
η^2	Effektstärke	i	Anzahl
λ	Wellenlänge	%	Prozent
σ	Standardabweichung	a, b, c, d	rezeptorale Wichtungsfaktoren
σ_E	Restfehler	T	zu testende Größe
τ	Transmissionsgrad	intern	systemintern
ΔF	Abweichung der Spektren	extern	systemextern
Δ	Abweichung	individuell	personenbezogen
$\Phi_{e,\lambda}$	Strahlungsfluss in W/nm		
Φ_v	Lichtstrom in lm		
Π_0	visueller Verarbeitungskanal der Stäbchen (langsam, skotopisch)		
Π'_0	visueller Verarbeitungskanal der Stäbchen Ω (schnell, mesopisch)		
Ω	Raumwinkel in sr		
\emptyset	Durchschnitt		

Indizes

A	Achromaten
C	Chormaten
e	energetisch
R	rezeptorbasiert
v	visuell
ref	Referenz
test	Test
min	Minimum
max	Maximum
ala	Alanin
ser	Serin
2;10,64	Gültigkeit für den jeweiligen Sehwinkel in °

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Workflow der Empirie zur Beschreibung einer wahrnehmungsorientierten Hellempfindung im mesopischen Bereich.....	16
Abbildung 2:	Struktur der Arbeit nach Schwerpunkten.....	17
Abbildung 3:	Schematischer Aufbau der retinalen Zellschichten (modifiziert)	20
Abbildung 4:	Spektraler Transmissionsgrad der Makula Lutea in Abhängigkeit der stimulierten Netzhautgröße	21
Abbildung 5:	Unterschiede im Stäbchen- und Zapfenaufbau.....	22
Abbildung 6:	Rezeptorverteilung in der Retina (transversaler Schnitt) mit detailliertem Überblick der Rezeptorverteilung je Zapfentyp	23
Abbildung 7:	Farbcodierte Darstellung der retinalen Zapfendichte (links) und der Stäbchendichte (rechts)	24
Abbildung 8:	Biological visual pathway (modifiziert und vereinfacht)	26
Abbildung 9:	Retinale Signalwege in den drei Bereichen des menschlichen Sehens	27
Abbildung 10:	Schematische Darstellung der Rezeptorartverschaltung zu Luminanz- (achromatisch) und Chrominanzkanälen unter mesopischen Bedingungen	28
Abbildung 11:	Basismodell (links) und erweitertes Modell (rechts) zur Hellempfindung	30
Abbildung 12:	Übersicht über Mechanismen und Einstellzeiten zur Adaptationsfähigkeit	31
Abbildung 13:	Rezeptorbasierte Dunkeladaptationskurven in Abhängigkeit der Adaptationszeit	32
Abbildung 14:	Variation der relativen spektralen Transmission des Auges in Abhängigkeit des Alters	33
Abbildung 15:	Altersabhängige relative spektrale Empfindlichkeitskurven	34
Abbildung 16:	Mittlerer Pupillendurchmesser in Abhängigkeit des Alters	34
Abbildung 17:	Abnahme der Stäbchen in der Netzhautperipherie (I) und der Zellen im LGN (II).....	35
Abbildung 18:	Altersabhängige Ausdehnung des Gesichtsfeldes (monokular)	36
Abbildung 19:	Dunkeladaptation als Funktion des Alters	36
Abbildung 20:	Altersabhängige Schwächungsfaktoren für Normlichtart A und D65 bezüglich des Hellempfindens unter photopischen Bedingungen	37
Abbildung 21:	Entstehung der $V(\lambda)$ -Kurve	47
Abbildung 22:	Gegenüberstellung der Originaldaten zur Entstehung der $V(\lambda)$ Funktion und der Modifikationen von $V_m(\lambda)$	47
Abbildung 23:	Photopische und skotopische spektrale Hellempfindlichkeitskurven der Normalbeobachter, bezogen auf das jeweilige maximale Strahlungsäquivalent .	50
Abbildung 24:	Übersicht der Eingrenzung des mesopischen Bereichs unter Angabe der photopischen Leuchtdichte	51
Abbildung 25:	Entwicklung und Finalisierung der $V^*(\lambda)$ als physiologische Hellempfindungsfunktion.....	66
Abbildung 26:	Gegenüberstellung spektraler Hellempfindlichkeitsfunktionen in Abhängigkeit der Erhebungsmethode	67
Abbildung 27:	Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen bei kleinen fovealen Feldgrößen und retinaler Beleuchtungsstärke	69
Abbildung 28:	Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktionen bei großen Feldgrößen in Abhängigkeit von der Adaptationsleuchtdichte im mesopischen Bereich	70
Abbildung 29:	SAGAWAs vorgeschlagenes System zur ergänzenden Photometrie.....	73

Abbildung 30: Vergleich der direkt-, gedächtnis- und sukzessivbasierten Vergleichsmethoden..	80
Abbildung 31: Darstellung der spektralen Verläufe genutzter Empfindlichkeitsfunktionen aus Tabelle 8	86
Abbildung 32: Funktionseinheiten der programmierbaren Lichtquelle OL 490.....	91
Abbildung 33: Schematische Darstellung der Funktionsweise des OL 490 und des DMD- Chips.....	91
Abbildung 34: Intensitätsverlauf über die Betriebsdauer der eingesetzten Lampenprimäre des OL 490.....	92
Abbildung 35: Spektrale Reflexionseigenschaft von Halon und reinem Bariumsulfat	93
Abbildung 36: Spektrale Reflexionseigenschaften und deren zeitliche Konstanz von Bariumsulfat	94
Abbildung 37: Leuchtdichtevertelung der Stimulusprojektionsfläche	94
Abbildung 38: Hauptelemente des verwendeten Forschungsaufbaus.....	96
Abbildung 39: GUI des "Spectrum Generator" und deren Funktionalitäten	99
Abbildung 40: Einflussfaktoren und deren Effekte auf die Spektrenerstellung mittels OL 490	102
Abbildung 41: Gemessene relative spektrale Intensitäten des Lichtquellenprimärs bei 21 Abstufungen.....	104
Abbildung 42: Beispiele für Linearisierungsfunktionen über den Gesamtbereich der Intensitätsreglung.....	105
Abbildung 43: Übersicht zentraler Arbeitsschritte zur Spektrenerzeugung und Kalibrierung des OL 490 und Umsetzung als Automatisierung.....	107
Abbildung 44: Intensitätsstufen des simulierten LED-Spektrums, durch "SpecPack" erzeugt (164 Stufen)	109
Abbildung 45: Versuchsvariablen des Pretests	117
Abbildung 46: Versuchsablauf in schematischer Darstellung.....	119
Abbildung 47: Ergebnisse des NCT für die Methode der MBM (Pretest).....	122
Abbildung 48: Ergebnisse des NCT für die Methode der SBBM (Pretest)	123
Abbildung 49: Methodenabhängiger Vergleich der Standardabweichungen (SD) für das DBM, MBM, SBBM	124
Abbildung 50: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungs- systems I.....	133
Abbildung 51: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungs- systems II.....	136
Abbildung 52: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungs- systems III.....	138
Abbildung 53: Ergebnisse des NCT (Maintest) der Methode SBBM.....	139
Abbildung 54: Korrelation der Abgleichwiederholungsvorgänge	140
Abbildung 55: Gegenüberstellung ergänzender Systeme der Photometrie anhand empirischer Daten aus Abgleichen der mesopischen Hellempfindung.....	143
Abbildung 56: Empfindlichkeitskurven SML-Zapfen (normiert)	148
Abbildung 57: Berechnete Flächen der Wichtungsfaktoren a,b,c,d in Abhängigkeit von der Adaptationsleuchtdichte und der stimulierten Netzhautgröße.....	151
Abbildung 58: Berechnungsanweisung zur Ermittlung einer rezeptorbasierten mesopischen Hellempfindung über ein äquivalentes Leuchtdichteverhältnis.....	152
Abbildung 59: Restfehlerdarstellung der CIE 91 Workshop Data einzelner ergänzender Systeme der Photometrie	156
Abbildung 60: Darstellung dominanzbehafteter Unterschiede eines 10° Beobachters.....	159

Abbildung 61: Interpretation der Probandenvariation hinsichtlich der Abweichungsindizes A und B je Sehzeichengröße	159
Abbildung 62: Unterschiede der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion in Abhängigkeit der Erhebungsmethode als Kriterium zur Einordnung visueller Dominanztypen	160
Abbildung 63: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des achromatischen Dominanzclusters.....	163
Abbildung 64: Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des chromatischen Dominanzclusters	163
Abbildung 65: Differenz der dominanzbehafteten äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse eines mesopischen Hellempfindens für die stimulierte Netzhautgröße von $1,25^\circ$	164
Abbildung 66: Gegenüberstellung der originalen Spektren und der simulierten Stimuluspektren auf den vier Leuchtdichteadaptationsniveaus – Teil A.....	209
Abbildung 67: Gegenüberstellung der originalen Spektren und der simulierten Stimuluspektren auf den vier Leuchtdichteadaptationsniveaus – Teil B.....	210
Abbildung 68: Berechnete Flächen der Wichtungsfaktoren a_A, b_A, c_A, d_A in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte und der stimulierten Netzhautgröße sowie unter Betrachtung der achromatischen Dominanz.....	214
Abbildung 69: Berechnete Flächen der Wichtungsfaktoren a_C, b_C, c_C, d_C in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte und der stimulierten Netzhautgröße sowie unter Betrachtung der chromatischen Dominanz	216

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Maximale spektrale Empfindlichkeitsbereiche der Zapfenrezeptoren	22
Tabelle 2:	Eingrenzung des Auftretens des Purkinje-Effekts	39
Tabelle 3:	Untersuchungen und Untersuchungsparameter zur Entstehung der $V(\lambda)$ - Funktion	45
Tabelle 4:	Übersicht der Untersuchungsparameter zur Entwicklung der $V_{b,2}(\lambda)$ - Funktion	48
Tabelle 5:	Methodenübersicht zur Bestimmung der Hellempfindung, spektralen Hellempfindlichkeit.....	58
Tabelle 6:	Übersicht helligkeitsbasierter ergänzender Modelle der Photometrie.....	72
Tabelle 7:	Studiengegenüberstellung zum Abgleich auf gleiche Hellempfindung und deren Parameter	79
Tabelle 8:	Zuordnung spezieller spektraler Hellempfindlichkeitsfunktionen einzelner in der Auswertung zu betrachtender Bewertungssysteme	85
Tabelle 9:	Minimale und maximale Leuchtdichten und deren Abweichung.....	95
Tabelle 10:	Maximale Abweichung der gemessenen zur programmierten Wellenlänge des Forschungsaufbaus an vier Messpunkten P1-P4.....	95
Tabelle 11:	Anforderungen an eine zu entwickelnde OL 490 Ansteuerung und Spektrengenerierung.....	97
Tabelle 12:	Kumulierte, prozentuale Abweichung der simulierten Spektren unter radiometrischer und photometrischer Betrachtungsweise	108
Tabelle 13:	Übersicht lichttechnischer Kennzahlen der simulierten Spektren.....	109
Tabelle 14:	Aufstellung der Einflussfaktoren auf die Stimuluspräsentation und deren Einzel- und Gesamtfehlerkenngrößen	113
Tabelle 15:	Spektrale Abweichungen δ_λ des Forschungsstandes	114
Tabelle 16:	Maximale spektrale Abweichungen und deren Auswirkung auf die Gesamtfehlerkenngröße.....	114
Tabelle 17:	Übersicht der Probandenstichprobe für den Pretest	118
Tabelle 18:	Zuordnung der Itemreihenfolge der Variablen Spektrum und stimulierte Netzhautgröße	120
Tabelle 19:	Mittelwerte und Standardabweichungen des NCT-Pretests.....	123
Tabelle 20:	Abhängige und unabhängige Variablen des Hauptversuchs	129
Tabelle 21:	Äquivalente Leuchtdichteverhältnisse verwandter wissenschaftlicher Studien.....	144
Tabelle 22:	Übersicht der Wichtungsfaktoren und deren Polynomglieder des rezeptorbasierten Modells einer mesopischen Hellempfindung sowie dem Bestimmtheitsmaß.....	152
Tabelle 23:	Übersicht der Wichtungsfaktoren und deren Polynomglieder des durch achromatische Dominanz geprägten rezeptorbasierten Modells einer mesopischen Hellempfindung	165
Tabelle 24:	Übersicht der Wichtungsfaktoren und deren Polynomglieder des durch chromatische Dominanz geprägten rezeptorbasierten Modells einer mesopischen Hellempfindung	166
Tabelle 25:	Zusammenfassung wichtiger Anwendungsgebiete der Mesopie - Teil A.....	202
Tabelle 26:	Zusammenfassung wichtiger Anwendungsgebiete der Mesopie - Teil B.....	203

Tabelle 27:	Relative und energetisch basierte spektrale Empfindlichkeiten verschiedener Hellempfindlichkeitsfunktionen	204
Tabelle 28:	Relative, energetisch basierte spektrale Empfindlichkeiten einzelner Rezeptortypen und deren photometrische Strahlungsäquivalente bei $\lambda_0=555,016$ nm.....	205
Tabelle 29:	Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungssystems I.....	211
Tabelle 30:	Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungssystems II.....	211
Tabelle 31:	Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungssystems III	212
Tabelle 32:	Berechnete Wichtungsfaktoren a,b,c,d für äquivalente Leuchtdichten basierend auf den spektralen Empfindlichkeitsfunktionen von SMLV'(λ) in Abhängigkeit von Lad und α	213
Tabelle 33:	Berechnete äquivalente Leuchtdichten der Testspektren durch das rezeptorbasierte Modell einer mesopischen Hellempfindung und deren interne und externe Validierung nach CIE 141 und Restfehlerwerten σ_E	213
Tabelle 34:	Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) unter Annahme der achromatischen Dominanz	214
Tabelle 35:	Berechnete achromatische Wichtungsfaktoren a_A, b_A, c_A, d_A für äquivalente Leuchtdichten basierend auf den spektralen Empfindlichkeitsfunktionen von SMLV'(λ) in Abhängigkeit von Lad; α und der Ausprägung achromatische Dominanz.....	215
Tabelle 36:	Berechnete äquivalente Leuchtdichten der Testspektren durch das achromatisch geprägte, rezeptorbasierte Modell einer mesopischen Hellempfindung und deren interne und externe Validierung nach CIE 141 und Restfehlerwerten σ_E	215
Tabelle 37:	Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) unter Annahme der chromatischen Dominanz.....	216
Tabelle 38:	Berechnete chromatische Wichtungsfaktoren a_C, b_C, c_C, d_C für äquivalente Leuchtdichten basierend auf den spektralen Empfindlichkeitsfunktionen von SMLV'(λ) in Abhängigkeit von Lad; α und der Ausprägung chromatische Dominanz.....	217
Tabelle 39:	Berechnete äquivalente Leuchtdichten der Testspektren durch das chromatisch geprägte, rezeptorbasierte Modell einer mesopischen Hellempfindung und deren interne und externe Validierung nach CIE 141 und Restfehlerwerten σ_E	217
Tabelle 40:	Übersicht der betreuten wissenschaftlichen Arbeiten	219

Verzeichnis des Anhangs

ANHANG – KAPITEL 1	202
ANHANG – KAPITEL 4	204
ANHANG – KAPITEL 5	206
ANHANG – KAPITEL 6	209
ANHANG – KAPITEL 9	211
ANHANG – KAPITEL 10	213
ANHANG – KAPITEL 11	215
PROBANDENINSTRUKTION	218
BETREUTE WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN	219

Anwendungsgebiet		Angegebene Werte, Bereichsgrenze	Bemerkung	Quelle
Automotive	gemessene reale Leuchtdichte	0,01-3,5 cd/m ² [Ø 1,64 cd/m ²]	trocken, Xenonsystem	[KLEINKES 2003]
		0,01-2,3 cd/m ² [Ø 1,04 cd/m ²]	trocken, Halogensystem	
		0,11-1,48 cd/m ²	trocken, H1-Halogen-System	[S.-CLAUSEN ET AL. 2001]
	Kempfort-leuchtdichte	Ø 0,8-2,46 cd/m ²	je Halogen-Scheinwerferpaar für vorliegende Gesamtlichtverteilung	[KÖHLER 2006]
		Ø 1,27-2,36 cd/m ²	je Xenon-Scheinwerferpaar für vorliegende Gesamtlichtverteilung	
		Ø 0,66-1,37 cd/m ²	je LED-Scheinwerferpaar für vorliegende Gesamtlichtverteilung	
		0,5-0,8 cd/m ²	subjektiv optimale Helligkeit von Fahrbahnoberflächen. Dies wird als diejenige Leuchtdichte verstanden, welche dem Kraftfahrer unter den jeweiligen Straßen und Verkehrsbedingungen als optimal erscheint.	[S.-CLAUSEN ET AL. 1991]
ortsfeste Straßenbeleuchtung	Deutschland	0,5-2 cd/m ²	Hauptstraßen mit mittleren bis hohem Verkehrsaufkommen	[DIN EN 13201-2]
	Großbritannien	0,5-2 cd/m ²		[BS EN 13201-2]
	USA	0,3-1,2 cd/m ²		[IESNA RP-8-00]
	Japan	0,5-1,0 cd/m ²		[JRA 2007]
Notausgangsbeleuchtung	USA	1-10 lx		[NFPA 2002]
	Kanada	1-10 lx		[CCBFC 2002]
	Europa	Min: 1 lx		[CEN EN 1838]
	Messung im realen Umfeld	0,006-34,9 cd/m ²	berechnet nach gemessenen Bleuchtungsstärken (0,1-548 lx) und Reflexionsgrad 0,2	[OUELLETTE ET AL. 1993]
	Laborstudie	0,0001-3,33 cd/m ²	berechnet nach gemessenen Bleuchtungsstärken (0,007-232,7 lx) und Reflexionsgrad 0,045	[MOULDER ET AL. 2005]

Tabelle 25: Zusammenfassung wichtiger Anwendungsgebiete der Mesopie - Teil A

Anwendungsgebiet		Angegebene Werte, Bereichsgrenze	Bemerkung	Quelle
Ambiente Beleuchtung	Kraftfahrzeug	0,002-0,2 cd/m ²	Fahrer: Ambiente Leuchtdichte: Diese Lichtfunktionen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie während der Fahrt betrieben werden. Der Fahrer sollte durch sie nicht gestört werden. Ambiente Beleuchtungen sollen die Wahrnehmung des Fahrzeuginnenraums verbessern und dem Fahrer eine angenehme Arbeitsatmosphäre vermitteln. Durch eine angepasste Adaptation kann die Reaktionszeit verbessert werden.	[GRIMM 2003]
		Max: 0,397 cd/m ²	Beifahrer, Feldversuch	[FRANZKE 2006]
		Max: 0,250 cd/m ²	Fahrer, Feldversuch	[FRANZKE 2006]
		0,003-0,5 cd/m ³ bis zu 2 cd/m ²	unterschiedliche Zonen Akzentbeleuchtung	[CABERLETTI ET AL. 2009] [CABERLETTI ET AL. 2010]
Cockpitbeleuchtung	Studie	Max: 20 cd/m ²		[POLSTER 2010]

Tabelle 26: Zusammenfassung wichtiger Anwendungsgebiete der Mesopie - Teil B

Wellenlänge [λ]	lineare energetische relative spektrale Empfindlichkeit						
	V(λ)	V ₂ [*] (λ)	V _{B2} (λ)	V ₁₀ [*] (λ)	V _{B10} (λ)	V _{K64} (λ)	V [*] (λ)
360	3,92E-06						
370	1,24E-05						
380	3,90E-05						5,89E-04
390	1,20E-04	4,13E-04		4,06E-04			2,21E-03
400	3,96E-04	2,45E-03	6,76E-03	2,59E-03	6,76E-03	1,10E-03	9,29E-03
410	1,21E-03	9,09E-03	1,78E-02	1,04E-02	2,09E-02	3,50E-03	3,48E-02
420	4,00E-03	2,04E-02	3,47E-02	2,60E-02	5,62E-02	1,50E-02	9,66E-02
430	1,16E-02	3,38E-02	5,01E-02	4,78E-02	8,91E-02	3,60E-02	2,00E-01
440	2,30E-02	5,15E-02	6,61E-02	7,65E-02	1,32E-01	6,50E-02	3,28E-01
450	3,80E-02	6,65E-02	7,94E-02	1,07E-01	1,66E-01	1,10E-01	4,55E-01
460	6,00E-02	8,77E-02	1,00E-01	1,46E-01	2,14E-01	1,60E-01	5,67E-01
470	9,10E-02	1,34E-01	1,38E-01	2,06E-01	2,82E-01	2,40E-01	6,76E-01
480	1,39E-01	1,83E-01	1,82E-01	2,76E-01	3,63E-01	3,20E-01	7,93E-01
490	2,08E-01	2,43E-01	2,29E-01	3,64E-01	4,37E-01	3,80E-01	9,04E-01
500	3,23E-01	3,55E-01	3,39E-01	4,88E-01	5,62E-01	4,70E-01	9,82E-01
510	5,03E-01	5,29E-01	5,50E-01	6,36E-01	7,24E-01	5,90E-01	9,97E-01
520	7,10E-01	7,28E-01	7,59E-01	7,90E-01	8,91E-01	7,40E-01	9,35E-01
530	8,62E-01	8,66E-01	9,33E-01	8,93E-01	9,33E-01	8,90E-01	8,11E-01
540	9,54E-01	9,61E-01	9,77E-01	9,73E-01	9,77E-01	9,60E-01	6,50E-01
550	9,95E-01	9,92E-01	1,00E+00	9,93E-01	1,00E+00	1,00E+00	4,81E-01
560	9,95E-01	9,95E-01	8,91E-01	9,92E-01	8,91E-01	9,60E-01	3,29E-01
570	9,52E-01	9,65E-01	7,76E-01	9,55E-01	7,76E-01	8,90E-01	2,08E-01
580	8,70E-01	8,82E-01	7,24E-01	8,63E-01	7,24E-01	8,10E-01	1,21E-01
590	7,57E-01	7,92E-01	6,92E-01	7,67E-01	6,92E-01	5,90E-01	6,55E-02
600	6,31E-01	6,69E-01	6,31E-01	6,40E-01	6,31E-01	5,50E-01	3,32E-02
610	5,03E-01	5,35E-01	5,62E-01	5,06E-01	5,62E-01	4,50E-01	1,59E-02
620	3,81E-01	4,03E-01	4,79E-01	3,76E-01	4,79E-01	3,00E-01	7,37E-03
630	2,65E-01	2,82E-01	3,72E-01	2,61E-01	3,72E-01	2,30E-01	3,34E-03
640	1,75E-01	1,83E-01	2,57E-01	1,68E-01	2,57E-01	1,40E-01	1,50E-03
650	1,07E-01	1,12E-01	1,62E-01	1,02E-01	1,62E-01	8,50E-02	6,77E-04
660	6,10E-02	6,27E-02	1,00E-01	5,68E-02	1,00E-01	5,20E-02	3,13E-04
670	3,20E-02	3,34E-02	5,50E-02	3,02E-02	5,50E-02	2,60E-02	1,48E-04
680	1,70E-02	1,70E-02	2,82E-02	1,53E-02	2,82E-02	1,40E-02	7,15E-05
690	8,21E-03	8,13E-03	1,41E-02	7,33E-03	1,41E-02	7,20E-03	3,53E-05
700	4,10E-03	3,94E-03	7,24E-03	3,55E-03	7,24E-03	3,60E-03	1,78E-05
710	2,09E-03	1,87E-03	3,47E-03	1,69E-03	3,47E-03		9,14E-06
720	1,05E-03	8,87E-04	1,74E-03	7,99E-04	1,74E-03		4,78E-06
730	5,20E-04	4,28E-04	8,32E-04	3,85E-04	8,32E-04		2,55E-06
740	2,49E-04	2,08E-04		1,88E-04			1,38E-06
750	1,20E-04	1,04E-04		9,34E-05			7,60E-07
760	6,00E-05	5,24E-05		4,72E-05			4,25E-07
770	3,00E-05	2,69E-05		2,42E-05			2,41E-07
780	1,50E-05	1,40E-05		1,26E-05			1,39E-07
790	7,47E-06	7,40E-06		6,66E-06			
800	3,70E-06	3,96E-06		3,57E-06			
810	1,84E-06	2,15E-06		1,94E-06			
820	9,11E-07	1,19E-06		1,07E-06			
830	4,52E-07	6,64E-07		5,98E-07			

Tabelle 27: Relative und energetisch basierte spektrale Empfindlichkeiten verschiedener Hellempfindlichkeitsfunktionen ($V_{B2}(\lambda)$ & $V_{B10}(\lambda)$) normiert auf deren maximale spektrale Empfindlichkeit bei $\lambda_{\max}=550$ nm, äquivalent zu $V_{K64}(\lambda)$ [vgl. CIE 18; SHARPE ET AL. 2005 & CVRL; CIE 75; KOKOSCHKA ET AL. 1985; CIE 1951; CIE 4]

Wellenlänge [λ]	lineare energetische relative spektrale Empfindlichkeit		
	L(λ)	M(λ)	S(λ)
390	4,15E-04	3,68E-04	9,55E-03
400	2,41E-03	2,27E-03	5,66E-02
410	8,72E-03	8,79E-03	2,33E-01
420	1,84E-02	2,17E-02	5,44E-01
430	2,82E-02	3,95E-02	8,03E-01
440	4,03E-02	6,48E-02	9,91E-01
450	4,99E-02	8,71E-02	9,55E-01
460	6,47E-02	1,16E-01	7,87E-01
470	9,95E-02	1,76E-01	6,46E-01
480	1,40E-01	2,36E-01	3,90E-01
490	1,92E-01	3,04E-01	2,12E-01
500	2,89E-01	4,28E-01	1,23E-01
510	4,44E-01	6,16E-01	6,08E-02
520	6,29E-01	8,17E-01	2,92E-02
530	7,71E-01	9,36E-01	1,26E-02
540	8,81E-01	9,95E-01	5,09E-03
550	9,40E-01	9,77E-01	1,96E-03
560	9,81E-01	9,18E-01	7,40E-04
570	1,00E+00	8,14E-01	2,82E-04
580	9,69E-01	6,53E-01	1,09E-04
590	9,28E-01	4,93E-01	4,39E-05
600	8,34E-01	3,34E-01	1,83E-05
610	7,06E-01	2,05E-01	8,03E-06
620	5,54E-01	1,17E-01	
630	4,01E-01	6,21E-02	
640	2,66E-01	3,14E-02	
650	1,65E-01	1,54E-02	
660	9,30E-02	7,30E-03	
670	4,99E-02	3,44E-03	
680	2,54E-02	1,64E-03	
690	1,22E-02	7,61E-04	
700	5,90E-03	3,65E-04	
710	2,80E-03	1,74E-04	
720	1,33E-03	8,42E-05	
730	6,39E-04	4,16E-05	
740	3,11E-04	2,09E-05	
750	1,55E-04	1,08E-05	
760	7,80E-05	5,69E-06	
770	3,99E-05	3,03E-06	
780	2,07E-05	1,63E-06	
790	1,09E-05	8,99E-07	
800	5,85E-06	5,03E-07	
810	3,17E-06	2,86E-07	
820	1,75E-06	1,65E-07	
830	9,74E-07	9,53E-08	
K_{m,R} in cd·sr/W	707,19	714,09	568643,88

Tabelle 28: Relative, energetisch basierte spektrale Empfindlichkeiten einzelner Rezeptortypen und deren photometrische Strahlungsäquivalente bei $\lambda_0=555,016$ nm (S(λ): spektrale Empfindlichkeit der S-Zapfen; M(λ): spektrale Empfindlichkeit der M-Zapfen; L(λ): spektrale Empfindlichkeit der L-Zapfen; K_{m,R}: rezeptorbasierte photometrische Strahlungsäquivalente) [vgl. STOCKMAN ET AL. 1999; 2000]

Herstellung des Innenbelags von Photometerkugeln

I. Herstellung der Beschichtungsmasse

1) Grundbeschichtung (1. und 2. Schicht)

Material	Gewichtsanteil	Nr. der Schicht
BaSO ₄ ⁺)	100	} 1.
H ₂ O (dest.)	40	
Polyvinylalkohol ⁺⁺)	4	
BaSO ₄	100	} 2.
H ₂ O (dest.)	40	
Polyvinylalkohol	2	

⁺) z.B. Bariumsulfat reinst für Röntgenzwecke,
E. Merck, Darmstadt, Art.-Nr. 821038

⁺⁺) z.B. Polyvinylalkohol zur Synthese, Merck-Schuchardt,
Art.-Nr. 821038, Code Nr. PO 096

- a) BaSO₄-Pulver durch ein Sieb (Perlon-Teesieb oder besser noch feiner) geben,
- b) durchgeseiebtes Pulver mit pulverförmigem Polyvinylalkohol vermengen,
- c) Gemisch durch Sieb geben,
- d) unter ständigem Rühren des Gemisches langsam dest. Wasser hinzugeben. In der entstehenden breiartigen Masse finden sich mehr oder weniger kleine, glasige Kügelchen aus Polyvinylalkohol. Das ist jedoch für die Grundbeschichtung unerheblich.

2) 3. Schicht

- a) 20 Teile Polyvinylalkohol in 100 Teile dest. Wassers rühren,
- b) langsam und unter ständigem Rühren solange erhitzen, bis der größte Teil der aufgequollenen Polyvinylalkohol-Körner sich aufgelöst hat,
- c) Lösung einschließlich Klumpen durch ein Sieb streichen,
- d) abkühlen lassen bis sämtliche Luftblasen entwichen sind (die Lösung kann in einer größeren Menge hergestellt und in einem geschlossenen Gefäß aufbewahrt werden),
- e) BaSO_4 -Pulver durch ein Sieb geben,
- f) zum durchgeseibten Pulver soviel dest. Wasser geben bis breiartige Masse entsteht,
- g) auf ungefähr 125 ml dieser Masse 1 Teelöffel der angesetzten wässrigen Lösung von Polyvinylalkohol geben

Anmerkung

Die Beschichtungsmasse sollte jeweils so trocken wie möglich aufgestrichen werden, da beim Trocknungsprozeß sonst starke Risse auftreten können. Unvermeidliche Haarrisse können beim Auftragen folgender Schichten übergespachtelt werden.

II. Bearbeitung der Kugelwand

Plexiglaskugeln können (falls sie sauber und fettfrei sind) ohne weitere Behandlung beschichtet werden.

Metallkugeln* müssen entrostet und grundiert werden. Lacke auf Epoxydharzbasis scheinen gut geeignet zu sein (z.B. Anstrich System Nr. CM3 von Teleplast GmbH & CoKG, 334 Wolfenbüttel, Grüner Platz 23-25; es handelt sich hierbei um Zweikomponentenlacke; der (weiße) Anstrichaufbau besteht aus Perfalon-L-Extra-Haftgrund, -Grundfarbe und -Lackfarbe).

Bestens bewährt hat sich ein grundierter Untergrund, auf den mullbindenartiges Gewebe aufgezogen und mit Epoxydharzkleber (Araldit) verklebt ist.

** Kugeln aus Aluminium werden eloxiert.*

III. Auftragen und Bearbeiten der Beschichtungsmasse

Das Auftragen der Beschichtungsmasse erfolgt mit einem Spachtel (Kuststoff!). Es ist darauf zu achten, daß jeder Auftrag erst trocken sein muß, ehe eine weitere Schicht aufgebracht wird. Der Kugelbelag sollte insgesamt einige Millimeter dick sein. Pro Arbeitsgang kann nur eine etwa 0,5 mm dicke Schicht aufgebracht werden.

Die unter I angegebenen Beschichtungsmassen werden in etwa der gleichen Gesamtschichtstärke möglichst glatt aufgetragen.

Wenn der Belag gut durchgetrocknet ist, wird er mit Schmirgelleinen abgestufter Körnung bearbeitet. Dabei darf der ausgeübte Druck nicht zu groß sein, um Kratzer zu vermeiden. Anschließend wird der Belag mit einem feinen Haarpinsel oder auch mit gereinigter Preßluft gesäubert. Die so bearbeitete Kugelfläche sollte jetzt praktisch keine Unebenheiten oder Kratzer mehr aufweisen.

Zum Schluß werden dann mit einer nicht zu flüssigen Suspension von BaSO_4 in dest. Wasser mehrere Schichten aufgesprüht. Falls die Fluoreszenz bei dem beabsichtigten Einsatz der Kugel keine Rolle spielt, kann auch hier etwas (weniger als 1 Gewichtsanteil) Polyvinylalkohol zugesetzt sein.

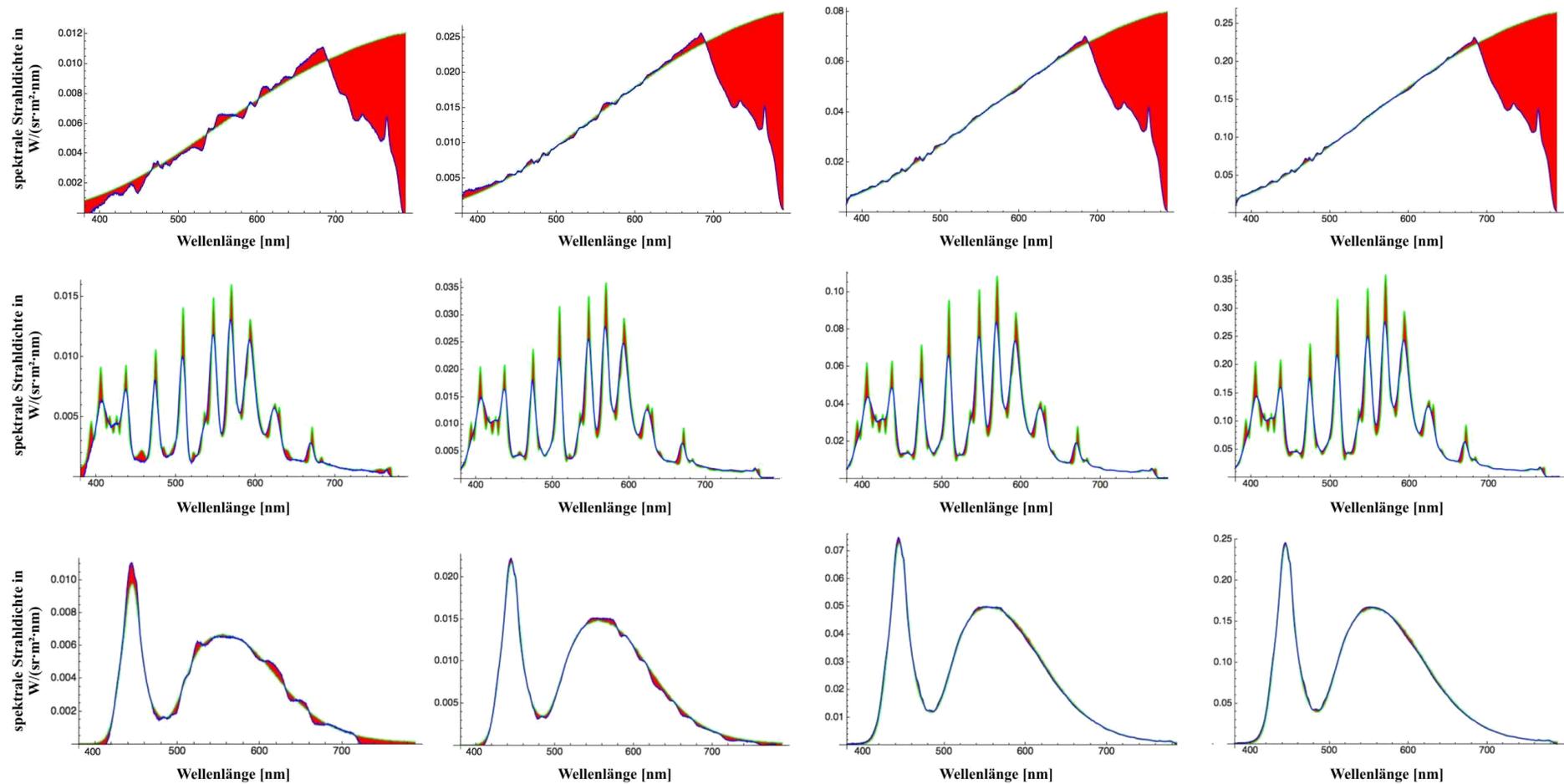


Abbildung 66: Gegenüberstellung der originalen Spektren und der simulierten Stimuluspektren auf den vier Leuchtdichteadaptationsniveaus – Teil A (grüne Linie: Originalspektren; blaue Linie: simulierte Spektren; rot: Defektstellen in der Simulation; von oben nach unten: Halogen, Xenon, LED, D65, P9K2; von links nach rechts: L=0,5 cd/m², L=1,0 cd/m², L=3,0 cd/m², L=10 cd/m²)

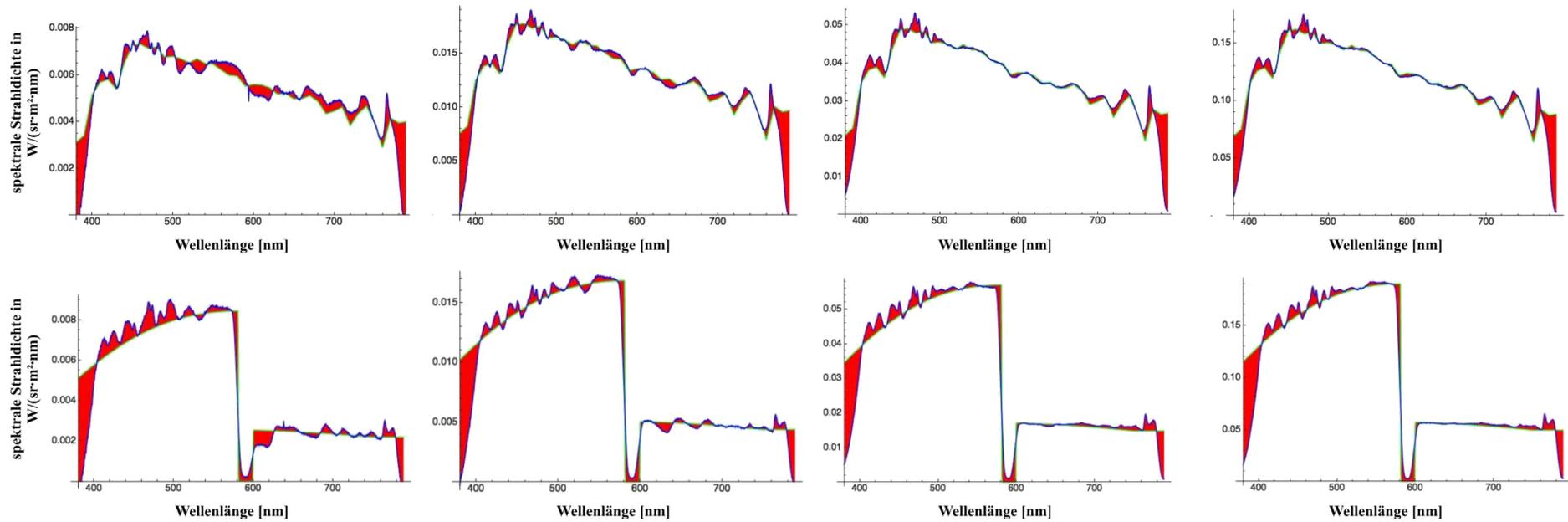


Abbildung 67: Gegenüberstellung der originalen Spektren und der simulierten Stimuluspektren auf den vier Leuchtdichteadaptationsniveaus – Teil B (grüne Linie: Originalspektren; blaue Linie: simulierte Spektren; rot: Defektstellen in der Simulation; von oben nach unten: Halogen, Xenon, LED, D65, P9K2; von links nach rechts: $L=0,5 \text{ cd/m}^2$, $L=1,0 \text{ cd/m}^2$, $L=3,0 \text{ cd/m}^2$, $L=10 \text{ cd/m}^2$)

L_{ad} in cd/m^2		Stimulierte Netzhautgröße											
		1,25°				10°				64°			
		0,5	1,0	3,0	10,0	0,5	1,0	3,0	10,0	0,5	1,0	3,0	10,0
Halogen*	$V_{eq,\%}$ in %	1,00	-0,34	0,34	-0,28	0,16	-0,03	0,16	-0,06	0,13	0,25	0,06	0,03
	σ	2,05	1,52	0,73	1,10	0,58	0,27	0,31	0,31	0,42	0,88	0,44	0,52
Xenon*	$V_{eq,\%}$ in %	-2,22	-4,63	-7,69	-9,88	-3,53	-3,47	-4,78	-5,69	-4,25	-3,47	-4,09	-1,91
	σ	7,55	6,69	5,46	5,56	6,36	4,29	6,12	5,46	5,42	5,22	8,29	7,04
LED*	$V_{eq,\%}$ in %	-5,34	-8,56	-11,34	-12,41	-4,31	-6,00	-8,97	-9,78	-3,25	-5,47	-6,06	-3,09
	σ	7,81	7,17	7,47	8,22	8,02	7,54	7,09	7,19	6,85	7,95	9,02	8,11
D65*	$V_{eq,\%}$ in %	-18,53	-22,59	-25,09	-25,84	-17,94	-19,66	-20,75	-19,81	-16,91	-14,72	-11,81	-9,97
	σ	12,66	13,51	12,55	10,11	15,50	13,48	11,97	10,33	10,02	11,66	12,36	8,46
P9K2*	$V_{eq,\%}$ in %	-27,88	-32,22	-34,94	-36,78	-26,16	-28,03	-29,41	-30,53	-22,66	-21,31	-20,34	-14,34
	σ	10,29	15,79	11,99	11,48	12,66	14,61	12,66	10,05	9,83	12,08	9,72	9,90

Tabelle 29: Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungssystems I (L_{ad} : Leuchtdichteadaptationsniveau; $V_{eq,\%}$: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis; σ : Standardabweichung)

$L_{s,ad}$ in cd/m^2		Stimulierte Netzhautgröße											
		1,25°				10°				64°			
		0,527	1,053	3,16	10,532	0,535	1,07	3,211	10,705	0,5	1,0	3,002	10,006
Halogen*	$V_{eq,\%}$ in %	1,00	-0,34	0,34	-0,28	0,16	-0,03	0,16	-0,06	0,13	0,25	0,06	0,03
	σ	2,05	1,52	0,73	1,10	0,58	0,27	0,31	0,31	0,42	0,88	0,44	0,52
Xenon*	$V_{eq,\%}$ in %	-2,53	-4,93	-7,98	-10,16	-2,59	-2,53	-3,86	-4,77	-2,41	-1,61	-2,25	-0,02
	σ	7,52	6,67	5,45	5,54	6,42	4,33	6,18	5,51	5,52	5,32	8,45	7,18
LED*	$V_{eq,\%}$ in %	-5,94	-9,14	-11,91	-12,96	-3,60	-5,30	-8,29	-9,11	-0,60	-2,88	-3,49	-0,44
	σ	7,76	7,12	7,43	8,16	8,08	7,60	7,15	7,24	7,04	8,17	9,27	8,34
D65*	$V_{eq,\%}$ in %	-18,15	-22,23	-24,75	-25,50	-14,10	-15,90	-17,05	-16,07	-10,36	-8,00	-4,86	-2,87
	σ	12,72	13,57	12,60	10,16	16,23	14,11	12,53	10,81	10,81	12,58	13,33	9,13
P9K2*	$V_{eq,\%}$ in %	-28,40	-32,71	-35,41	-37,24	-22,20	-24,18	-25,63	-26,81	-13,52	-12,01	-10,93	-4,22
	σ	10,21	15,67	11,90	11,40	13,33	15,39	13,33	10,59	10,99	13,51	10,87	11,07

Tabelle 30: Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungssystems II ($L_{s,ad}$: Systemleuchtdichteadaptationsniveau; $V_{eq,\%}$: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis; σ : Standardabweichung)

L _{s,ad} in cd/m ²		Stimulierte Netzhautgröße											
		1,25°				10°				64°			
		0,5	1,1	3,3	11,0	0,59	1,18	3,54	11,8	0,5	1,0	3,002	10,006
Halogen*	V _{eq,%} in %	0,99	-0,34	0,34	-0,28	0,16	-0,03	0,16	-0,06	0,13	0,25	0,06	0,03
	σ	2,05	1,52	0,73	1,10	0,58	0,27	0,31	0,31	0,42	0,88	0,44	0,52
Xenon*	V _{eq,%} in %	-6,37	-8,67	-11,60	-13,70	-6,19	-6,14	-7,41	-8,29	-2,41	-1,61	-2,25	-0,02
	σ	7,23	6,41	5,23	5,32	6,18	4,17	5,96	5,31	5,52	5,32	8,45	7,18
LED*	V _{eq,%} in %	-7,85	-10,97	-13,68	-14,72	-5,47	-7,14	-10,07	-10,87	-0,60	-2,88	-3,49	-0,44
	σ	7,60	6,98	7,28	8,00	7,92	7,45	7,01	7,10	7,04	8,17	9,27	8,34
D65*	V _{eq,%} in %	-18,06	-22,14	-24,65	-25,41	-12,14	-13,98	-15,15	-14,15	-10,36	-8,00	-4,86	-2,87
	σ	12,73	13,59	12,62	10,17	16,60	14,44	12,81	11,06	10,81	12,58	13,33	9,13
P9K2*	V _{eq,%} in %	-28,42	-32,73	-35,43	-37,25	-20,60	-22,62	-24,10	-25,31	-13,52	-12,01	-10,93	-4,22
	σ	10,21	15,67	11,90	11,40	13,61	15,70	13,61	10,81	10,99	13,51	10,87	11,07

Tabelle 31: Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) des Bewertungssystems III (L_{s,ad}: Systemleuchtdichteadaptationsniveau; V_{eq,%}: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis; σ: Standardabweichung)

Stimulierte Netzhautgröße in °	Leuchtdichte- adaptationsniveau in cd/m ²	Wichtungsfaktoren			
		a	b	c	d
1,25	0,5	-0,0005	0,3771	0,1519	0,3892
	1,0	-0,0005	0,3808	0,0932	0,4408
	3,0	-0,0003	0,6380	-0,0469	0,3733
	10,0	-0,0004	0,9462	-0,2211	0,3465
10,0	0,5	-0,0004	0,4051	0,2096	0,316
	1,0	-0,0004	0,3128	0,2147	0,3692
	3,0	-0,0004	0,4296	0,1496	0,346
	10,0	-0,0005	0,7559	-0,0472	0,3407
64,0	0,5	-0,0001	0,3368	0,3487	0,2092
	1,0	-0,0002	0,4427	0,2952	0,2081
	3,0	-0,0004	0,7841	0,1332	0,1646
	10,0	-0,0001	0,3659	0,4328	0,1412

Tabelle 32: Berechnete Wichtungsfaktoren a,b,c,d für äquivalente Leuchtdichten basierend auf den spektralen Empfindlichkeitsfunktionen von SMLV'(λ) in Abhängigkeit von Lad und α

Stimulierte Netzhaut- größe in °	Leuchtdichte der Referenz in cd/m ² (L _{R,v,Ref})						
	0,5	1,0	3,0	10,0			
Berechnete äquivalente Modellleuchtdichten der empirisch gewonnenen Abgleichdaten in cd/m ² (L _{R,v,Test}) - intern -	1,25	0,50276	0,9928	3,00552	9,99964	Halogen*	
	10,0	0,50031	0,99926	3,00738	9,99991		
	64,0	0,50063	0,99813	2,95123	9,99961		
			σ _{E, Halogen*}				0,01516
	1,25	0,50262	0,99331	3,00494	9,99969	Xenon*	
	10,0	0,49902	1,00263	3,00442	10,0004		
	64,0	0,49918	1,00208	2,94584	10,0002		
			σ _{E, Xenon*}				0,01663
	1,25	0,50728	0,9818	3,01352	9,99801	D65*	
	10,0	0,50279	0,99282	3,01152	9,99877		
	64,0	0,49814	1,00483	2,94435	10,0003		
			σ _{E, D65*}				0,01853
1,25	0,5089	0,97813	3,01613	9,99753	P9K2*		
10,0	0,50339	0,99132	3,01248	9,99852			
64,0	0,49835	1,00415	2,946	10,0001			
		σ _{E, P9K2*}				0,01908	
		σ _{E, intern}				0,01686	
Berechnete äquivalente Modellleuchtdichten der empirisch gewonnenen Abgleichdaten in cd/m ² (L _{R,v,Test}) - extern -	1,25	0,49211	0,96967	2,9971	10,0886	LED*	
	10,0	0,50261	0,99362	2,94202	9,69533		
	64,0	0,51737	1,0012	2,89464	9,96351		
			σ _{E, LED*}				0,10349
		σ _{E, extern}				0,10349	

Tabelle 33: Berechnete äquivalente Leuchtdichten der Testspektren durch das rezeptorbasierte Modell einer mesopischen Hellempfindung und deren interne und externe Validierung nach CIE 141 und Restfehlerwerten σ_E

L _{ad} in cd/m ²		Stimulierte Netzhautgröße											
		1,25°				10°				64°			
		0,5	1,0	3,0	10,0	0,5	1,0	3,0	10,0	0,5	1,0	3,0	10,0
Halogen*	V _{A,eq,%} in %	1,25	-0,30	0,15	-0,25	0,05	-0,05	0,15	-0,10	0,20	0,20	0,05	0,10
	σ	2,45	1,52	0,65	1,09	0,66	0,19	0,31	0,26	0,45	0,87	0,34	0,63
Xenon*	V _{A,eq,%} in %	-0,2	-3,15	-6,25	-8,65	-0,35	-1,10	-1,45	-2,80	-1,45	-0,90	-0,20	0,30
	σ	7,78	7,88	6,05	6,59	4,30	3,08	4,05	4,41	3,77	3,69	4,53	6,49
LED*	V _{A,eq,%} in %	-3,05	-7,00	-9,20	-10,50	0,45	-2,20	-5,00	-5,60	-0,25	-0,95	-1,90	0,60
	σ	5,96	8,47	8,30	9,21	3,48	5,14	4,91	5,76	5,77	5,18	6,48	6,64
D65*	V _{A,eq,%} in %	-14,35	-18,90	-21,90	-23,25	-9,30	-12,00	-12,70	-13,85	-11,35	-7,10	-4,40	-5,50
	σ	11,52	13,97	12,87	9,96	9,04	8,75	6,30	6,97	5,44	4,76	7,66	5,38
P9K2*	V _{A,eq,%} in %	-24,60	-26,95	-30,35	-32,95	-19,30	-20,75	-21,65	-24,45	-17,45	-13,65	-14,95	-9,90
	σ	10,52	17,48	12,31	12,64	9,51	12,69	8,80	7,27	7,65	6,04	6,43	6,43

Tabelle 34: Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) unter Annahme der achromatischen Dominanz (L_{ad}: Leuchtdichte-adaptationsniveau; V_{A,eq,%}: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis des achromatischen Dominanzclusters; σ: Standardabweichung)

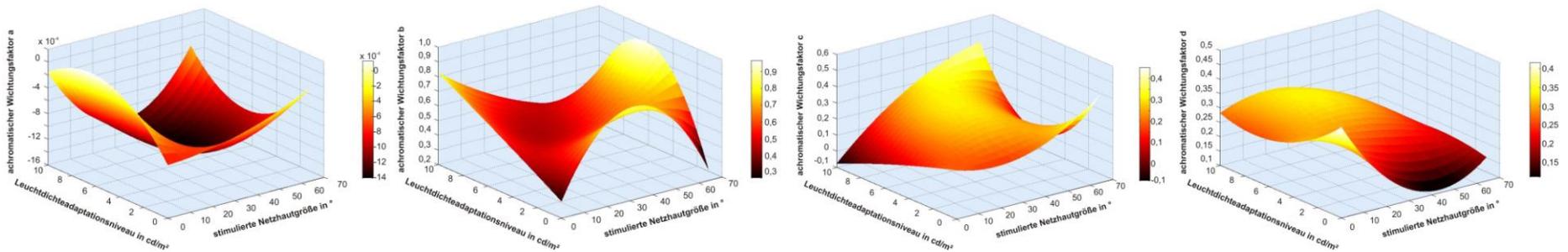


Abbildung 68: Berechnete Flächen der Wichtungsfaktoren a_A, b_A, c_A, d_A in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte und der stimulierten Netzhautgröße sowie unter Betrachtung der achromatischen Dominanz

Stimulierte Netzhautgröße in °	Leuchtdichte- adaptationsniveau in cd/m ²	Achromatische Wichtungsfaktoren			
		a _A	b _A	c _A	d _A
1,25	0,5	-0,0007	0,4600	0,1316	0,3811
	1,0	-0,0004	0,2786	0,2518	0,3622
	3,0	-0,0002	0,5040	0,1209	0,3096
	10,0	-0,0002	0,8064	-0,0590	0,2851
10,0	0,5	-0,0008	0,6169	0,1535	0,2897
	1,0	-0,0006	0,4798	0,2222	0,2947
	3,0	-0,0006	0,5066	0,1974	0,2952
	10,0	-0,0007	0,7089	0,0524	0,3085
64,0	0,5	-0,0003	0,3714	0,3611	0,2111
	1,0	-0,0004	0,5450	0,3155	0,1618
	3,0	-0,0008	0,8307	0,1081	0,2117
	10,0	-0,0003	0,3693	0,4500	0,1479

Tabelle 35: Berechnete achromatische Wichtungsfaktoren a_A, b_A, c_A, d_A für äquivalente Leuchtdichten basierend auf den spektralen Empfindlichkeitsfunktionen von SMLV'(λ) in Abhängigkeit von Lad; α und der Ausprägung achromatische Dominanz

	Stimulierte Netzhaut- größe in °	Leuchtdichte der Referenz in cd/m ² (L _{R,v,Ref})					
		0,5	1,0	3,0	10,0		
Berechnete äquivalente Modellleuchtdichten der empirisch gewonnenen Abgleichdaten in cd/m ² (L _{R,v,Test}) - intern - - achromatisch -	1,25	0,50301	0,99226	3,00602	9,99885	Halogen*	
	10,0	0,50029	0,99922	3,00061	9,99987		
	64,0	0,49991	1,00022	2,99983	10,00004		
			σ _{E, Halogen*}				0,00313
	1,25	0,50352	0,99097	3,00671	9,99869	Xenon*	
	10,0	0,50119	0,99694	3,00237	9,99956		
	64,0	0,49941	1,00160	2,99871	10,00027		
			σ _{E, Xenon*}				0,00384
	1,25	0,50764	0,98099	3,01410	9,99733	D65*	
	10,0	0,50496	0,98731	3,00970	9,99810		
	64,0	0,49353	1,01787	2,98579	10,0027		
			σ _{E, D65*}				0,0116
	1,25	0,50296	0,99243	3,00554	9,99896	P9K2*	
10,0	0,50267	0,99303	3,00529	9,99899			
64,0	0,49130	1,01231	2,98177	10,00377			
		σ _{E, P9K2*}				0,00829	
		σ _{E, intern}				0,0073	
Berechnete äquivalente Modellleuchtdichten der empirisch gewonnenen Abgleichdaten in cd/m ² (L _{R,v,Test}) - extern - - achromatisch -	1,25	0,48801	0,95837	3,01457	10,15047	LED*	
	10,0	0,49619	0,97141	2,88007	9,63364		
	64,0	0,49130	0,99452	2,85031	9,93567		
			σ _{E, LED*}				0,13511
			σ _{E, extern}				0,13511

Tabelle 36: Berechnete äquivalente Leuchtdichten der Testspektren durch das achromatisch geprägte, rezeptorbasierte Modell einer mesopischen Hellempfindung und deren interne und externe Validierung nach CIE 141 und Restfehlerwerten σ_E

L_{ad} in cd/m^2		Stimulierte Netzhautgröße											
		1,25°				10°				64°			
		0,5	1,0	3,0	10,0	0,5	1,0	3,0	10,0	0,5	1,0	3,0	10,0
Halogen*	$V_{C,eq,\%}$ in %	0,58	-0,42	0,67	-0,33	0,33	0,00	0,17	0,00	0,00	0,33	0,08	-0,08
	σ	1,11	1,6	0,79	1,19	0,4	0,38	0,33	0,38	0,38	0,93	0,59	0,25
Xenon*	$V_{C,eq,\%}$ in %	-5,58	-7,08	-10,08	-11,91	-8,83	-7,42	-10,33	-10,50	-8,92	-7,75	-10,58	-5,58
	σ	6,13	3,03	3,38	2,29	5,77	2,87	4,86	3,14	4,51	4,64	9,27	6,68
LED*	$V_{C,eq,\%}$ in %	-9,17	-11,17	-14,92	-15,58	-12,25	-12,33	-15,58	-16,75	-8,25	-13,00	-13,00	-9,25
	σ	9,32	3,17	4,15	5,25	7,09	6,71	4,87	1,72	5,61	5,70	8,59	6,62
D65*	$V_{C,eq,\%}$ in %	-25,5	-28,75	-30,42	-30,17	-32,33	-32,42	-34,17	-29,75	-26,17	-27,42	-24,17	-17,42
	σ	11,88	10,71	10,56	9,32	13,22	9,78	4,29	6,61	9,07	7,82	7,86	7,44
P9K2*	$V_{C,eq,\%}$ in %	-33,33	-41,0	-42,58	-43,17	-37,58	-40,17	-42,33	-40,67	-31,33	-34,08	-29,33	-21,75
	σ	7,56	6,58	6,55	5,12	8,21	8,17	4,92	3,63	6,32	7,88	7,32	10,51

Tabelle 37: Datentabelle der äquivalenten Leuchtdichteverhältnisse (Test zur Referenz) unter Annahme der chromatischen Dominanz (Lad: Leuchtdichte-adaptationsniveau; $V_{C,eq,\%}$: äquivalentes Leuchtdichteverhältnis des chromatischen Dominanzclusters; σ : Standardabweichung)

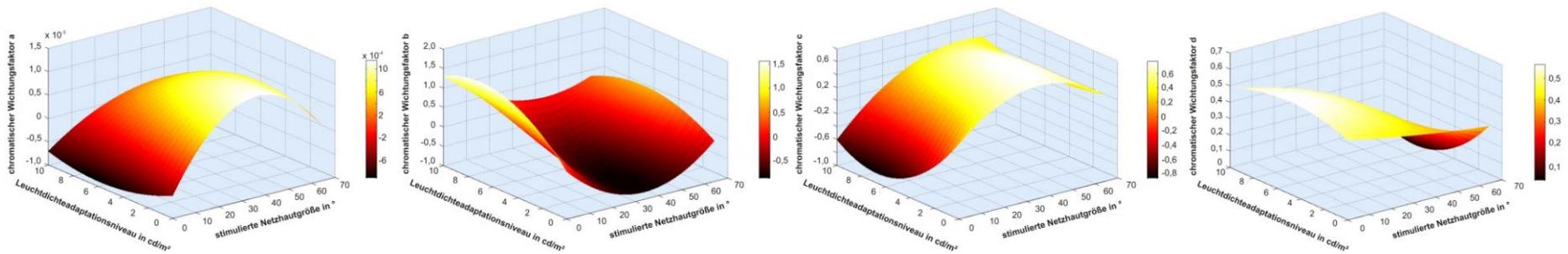


Abbildung 69: Berechnete Flächen der Wichtungsfaktoren a_c, b_c, c_c, d_c in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte und der stimulierten Netzhautgröße sowie unter Betrachtung der chromatischen Dominanz

Stimulierte Netzhautgröße in °	Leuchtdichte- adaptationsniveau in cd/m ²	Chromatische Wichtungsfaktoren			
		a _C	b _C	c _C	d _C
1,25	0,5	-0,0002	0,1771	0,2098	0,4131
	1,0	-0,0009	0,6295	-0,2690	0,6218
	3,0	-0,0006	0,9358	-0,4138	0,5209
	10,0	-0,0007	1,2434	-0,5618	0,4798
10,0	0,5	0,0004	-0,2442	0,4150	0,4154
	1,0	-0,0001	-0,1213	0,2097	0,5737
	3,0	0,0000	0,1552	0,0557	0,5187
	10,0	-0,0004	0,8216	-0,2635	0,4461
64,0	0,5	0,0004	0,2143	0,3402	0,2272
	1,0	0,0001	0,1601	0,2587	0,3496
	3,0	0,0006	0,5561	0,2468	0,0935
	10,0	0,0002	0,3333	0,4064	0,1406

Tabelle 38: Berechnete chromatische Wichtungsfaktoren a_C, b_C, c_C, d_C für äquivalente Leuchtdichten basierend auf den spektralen Empfindlichkeitsfunktionen von SMLV'(λ) in Abhängigkeit von Lad; α und der Ausprägung chromatische Dominanz

	Stimulierte Netzhaut- größe in °	Leuchtdichte der Referenz in cd/m ² (L _{R,v,Ref})					
		0,5	1,0	3,0	10,0		
Berechnete äquivalente Modellleuchtdichten der empirisch gewonnenen Abgleichdaten in cd/m ² (L _{R,v,Test}) - intern - - chromatisch -	1,25	0,50241	0,99374	3,00486	9,99911	Halogen*	
	10,0	0,50067	0,99818	3,00137	9,99970		
	64,0	0,49929	1,00191	2,99855	10,00028		
			σ _{E, Halogen*}				0,00272
	1,25	0,50100	0,99738	3,00193	9,99963	Xenon*	
	10,0	0,49554	1,01196	2,99108	10,00176		
	64,0	0,49584	1,01108	2,99168	10,00174		
			σ _{E, Xenon*}				0,00654
	1,25	0,50658	0,98344	3,01248	9,99759	D65*	
	10,0	0,49851	1,00395	2,99700	10,00067		
	64,0	0,50517	0,98657	3,01084	9,99771		
			σ _{E, D65*}				0,00872
	1,25	0,52104	0,95085	3,03686	9,99289	P9K2*	
10,0	0,50525	0,98668	3,00990	9,99804			
64,0	0,51088	0,97240	3,02283	9,99509			
		σ _{E, P9K2*}				0,02336	
		σ _{E, intern}				0,01254	
Berechnete äquivalente Modellleuchtdichten der empirisch gewonnenen Abgleichdaten in cd/m ² (L _{R,v,Test}) - extern - - chromatisch -	1,25	0,49843	0,98727	2,95144	9,94647	LED*	
	10,0	0,51527	1,03445	3,02886	9,75966		
	64,0	0,53299	1,01886	3,11728	9,99406		
			σ _{E, LED*}				0,08562
		σ _{E, extern}				0,08562	

Tabelle 39: Berechnete äquivalente Leuchtdichten der Testspektren durch das chromatisch geprägte, rezeptorbasierte Modell einer mesopischen Hellempfindung und deren interne und externe Validierung nach CIE 141 und Restfehlerwerten σ_E

Einleitung für den Probandenversuch

Lieber Proband, Liebe Probandin,

vielen Dank, dass Sie sich bereiterklärt haben an unserem Versuch teilzunehmen. Dieser Versuch wird im Dunkeln stattfinden. Sollten Sie Schwierigkeiten mit der Situation haben, wenden Sie sich bitte an den Versuchsleiter.

Im Laufe des Versuchs finden Sie vor sich eine Tastatur mit 3 Tasten. Weiterhin befindet sich für die Arretierung Ihres Kopfes zur Präsentationsfläche eine Kopfstütze. Diese wird Ihnen vor dem Versuch in die entsprechende Position geschoben. Bitte verschieben Sie diese nicht. Im Idealfall bildet die Abschlusskante der Kopfstütze eine Linie mit der des Tisches.

In dem Versuch geht es darum, dass sie ein Testlicht auf die gleiche Helligkeit wie die eines Referenzlichtes einstellen. Hierzu wird Ihnen vor jeden Durchgang ein Referenzlicht (gelblich) gezeigt. Prägen Sie sich dieses bitte ein. Über die Pfeiltasten (hoch, runter) können Sie die Helligkeit des Testlichtes regeln. Damit Sie eine Hilfestellung bei der Einstellung auf gleiche Helligkeit haben, können Sie die Taste R betätigen, um sich das Referenzlicht anzeigen lassen zu können. Solange Sie die Taste R gedrückt halten, solange sehen Sie das Referenzlicht.

Wenn Sie der Meinung sind, dass beide Lichter gleich hell sind, geben Sie dies bitte dem Versuchsleiter durch eine Wortäußerung an. Sie unterliegen bei den Einstellungen keiner Zeitbegrenzung. Es gibt kein Falsch oder Richtig, sondern es zählt nur die Qualität der Ergebnisse. Sollten Sie Fragen, Anmerkungen oder Ihnen Störungen auffallen, wenden Sie sich bitte an den Versuchsleiter.

Wir werden nun mit ein paar Probedurchläufen beginnen, damit Sie sich mit dem Versuchskonzept bekannt machen können.

Denken Sie bitte daran, dass Sie den Abgleich in der Mitte der Präsentationsfläche vornehmen, d.h. schauen Sie während des Versuches in die Mitte und nicht in andere Blickrichtungen und nehmen Sie den Kopf nicht aus der Arretierung.

Betreute wissenschaftliche Arbeiten

Nr.	Autor	Titel	Datum
1	Spillmann, Mathias	Aufbau eines Forschungsstandes zur Langzeitmessung von organischen Leuchtdioden	September 2008
2	Tack, Daniel	Untersuchung der Schwellenkontraste von achromatischen Stimuli unter mesopischen Bedingungen in Bezug auf die automobilen Lichttechnik	Juli 2009
3	Kühn, Michael	Programmierung einer Ansteuerung für die OL 490 Agile Light Source	September 2009
4	Holzhey, Claudia	Untersuchung der Hellempfindung verschiedener spektraler Verteilungen im mesopischen Bereich unter Verwendung einer sukzessiv-binokularen Vergleichsmethode	Januar 2010
5	Herd, Dietrich	Entwicklung einer Methode zur Berechnung von Normfarbwerten unterschiedlicher spektraler Verteilungen	Januar 2010
6	Ehrenstein, Ekkehard	Untersuchung zur Helligkeitswahrnehmung im mesopischen Bereich unter Varianz des visuellen Spektrums von Lichtquellen	Mai 2010
7	Letzin, Ronny	Aufbau eines Modells zur Hellempfindung im mesopischen Bereich	Oktober 2010
8	Töws, Elena	Ansätze zur Simulation variablenbedingter Effekte einer mesopischen Hellempfindung mittels Strukturgleichungsmodellen	September 2010

Tabelle 40: Übersicht der betreuten wissenschaftlichen Arbeiten

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe.

Die Dissertation ist bisher keiner anderen Fakultät vorgelegt worden.

Weiterhin erkläre ich, dass ich bisher kein Promotionsverfahren erfolglos beendet habe und dass keine Aberkennung eines bereits erworbenen Doktorgrades vorliegt.

Berlin, 12. Oktober 2011