

Achim Freiding

**Untersuchungen zur spektralen  
Empfindlichkeit des menschlichen Auges  
im mesopischen Bereich**



Herbert Utz Verlag · München

## **Darmstädter Lichttechnik**

herausgegeben vom Fachgebiet Lichttechnik  
der Technischen Universität Darmstadt

Zagl.: Dissertation, Darmstadt, Techn. Univ., 2010

Bibliografische Information der Deutschen  
Nationalbibliothek: Die Deutsche  
Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte  
bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere  
die der Übersetzung, des Nachdrucks, der  
Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe  
auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege  
und der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser  
Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2010

ISBN 978-3-8316-0991-8

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau des visuellen Systems.....</b>	<b>3</b>
2.1	Aufbau des Auges.....	3
2.2	Aufbau der Netzhaut.....	3
2.3	Photorezeptoren.....	7
2.4	Postrezeptorale Prozesse.....	10
2.5	Neuronale Farbkanäle.....	11
2.6	Achromatischer und chromatischer Kanal.....	14
<b>3</b>	<b>Psychophysiologische Grundlagen .....</b>	<b>21</b>
3.1	Untersuchungen zur spektralen Hellempfindlichkeit .....	21
3.1.1	Spektrale Hellempfindlichkeit im photopischen und skotopischen Bereich.....	22
3.1.2	Spektrale Hellempfindlichkeit im mesopischen Bereich....	26
3.2	Weiterführende Untersuchungen .....	30
3.2.1	Untersuchungen mit der Schwellenmethode .....	30
3.2.2	Untersuchungen im mesopischen Bereich.....	37
3.2.3	Untersuchungen zur Reaktionszeit .....	41
3.3	Effektive Lichtstärke .....	45
<b>4</b>	<b>Definition der Versuchsdurchführung.....</b>	<b>48</b>
4.1	Versuchsbedingungen.....	49
4.1.1	Untersuchungsmethoden .....	49
4.1.2	Auswahl des Schwinkels $\alpha$ .....	49
4.1.3	Auswahl des Beobachtungswinkels $\Theta$ .....	50
4.1.4	Auswahl der Umfeldleuchtdichten $L_U$ .....	50
4.1.5	Auswahl der Wellenlängen $\lambda$ .....	50
4.1.6	Auswahl der Pulsformen .....	51
4.1.7	Auswahl der Pulsdauern und Pulsfolgen .....	52
4.2	Parameterübersicht .....	53
4.3	Versuchsablauf und Testpersonen .....	53
<b>5</b>	<b>Darstellung des Versuchsaufbaus.....</b>	<b>56</b>
5.1	Versuchsaufbau mit seinen Komponenten .....	56
5.1.1	Lichtquelle.....	57
5.1.2	Monochromator .....	57
5.1.3	Modulator .....	57
5.1.4	Optischer Aufbau.....	58
5.2	Umfeldleuchtdichte .....	59

5.3	Kalibrierung des Versuchsaufbaus .....	59
5.3.1	Empfänger .....	60
5.3.2	Strahldichte des Testreizes .....	60
5.3.3	Wirksame Wellenlänge des Testreizes .....	61
<b>6</b>	<b>Statistische Auswertungsmethoden .....</b>	<b>63</b>
6.1	Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest .....	63
6.2	Kruskal-Wallis-Test .....	65
6.3	Zweistichprobentest .....	65
<b>7</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse .....</b>	<b>67</b>
7.1	Ergebnisse der Schwellenuntersuchungen .....	67
7.1.1	Streuung und Anschluss an den CIE-Normalbeobachter ...	67
7.1.2	Variation der Umfeldleuchtdichte .....	73
7.1.3	Variation des Beobachtungswinkels .....	79
7.1.4	Variation der Pulsdauer und der Pulsfolge .....	84
7.1.5	Variation der Pulsform .....	93
7.2	Ergebnisse der Reaktionszeitmessung .....	101
<b>8</b>	<b>Ansatz für ein beschreibendes Modell .....</b>	<b>107</b>
8.1	Einfluss der Umfeldleuchtdichte .....	111
8.2	Einfluss der Pulsdauer .....	114
8.3	Vereinfachtes Modell für den Einfluss der Umfeld- leuchtdichte .....	117
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>122</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>124</b>
<b>Anhang .....</b>		<b>151</b>
A1	Größen und Formelzeichen .....	151
A2	Wirksame Wellenlängen .....	154
A3	Kolmogorov-Smirnov-Test .....	155
A4	Zweistichprobentest .....	156
A5	Wertetabellen der Messergebnisse .....	158
<b>Lebenslauf .....</b>		<b>171</b>

# 1 Einführung

Die Photometrie, das Messen des Lichts entsprechend dem visuellen Eindruck, wird in die visuelle und die physikalische Photometrie unterteilt. Die visuelle Photometrie wurde bereits im 19. Jahrhundert angewandt, schon damals zeigte sich die spektrale Abhängigkeit der Hellempfindung (vgl. MAXWELL 1860 [163]). Mit dem Beginn der physikalischen Photometrie wurde es notwendig, die menschliche Hellempfindung und deren spektralen Verlauf zu kennen. 1903 wurde die Commission Internationale de Photometrie mit dem Ziel gegründet, die spektrale Hellempfindlichkeit zu bestimmen. Die Nachfolgeorganisation, die Commission Internationale d’Eclairage (CIE) veröffentlichte 1924 in einer Empfehlung den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad  $V(\lambda)$ . Dieser Hellempfindlichkeitsgrad gilt für ein Testzeichen unter einem Beobachtungswinkel von zwei Grad bei fovealer Beobachtung und photopischen Bedingungen (Tagessehen). Schon damals war bekannt, dass sich der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad in Abhängigkeit der Untersuchungsparameter, unter anderem der Helligkeit (Leuchtdichte), selbst ändert. Dieser Abhängigkeit wurde von der CIE in verschiedenen Publikationen Rechnung getragen. So wurde u. a. 1951 der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad  $V'(\lambda)$  für das Nachtsehen (skotopisches Sehen), 1964 ein spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für einen Sehwinkel von  $\alpha = 10^\circ$  unter photopischen Bedingungen und 1988 die spektrale Hellempfindlichkeit für die Untersuchungsmethode „direkter Helligkeitsabgleich“ veröffentlicht (vgl. SCHANDA ET AL. 2002 [206]).

Die spektralen Hellempfindlichkeitsgrade, die durch die CIE publiziert wurden, beschreiben die Hellempfindlichkeit für das Tages- und Nachtsehen. Für den Dämmerungsbereich (mesopisches Sehen) existiert keine international anerkannte Bewertungsfunktion, obwohl im nächtlichen Straßenverkehr und der Außenbeleuchtung Leuchtdichten auftreten, die im mesopischen Bereich liegen. Eine exakte Strahlungsbewertung unter diesen Gegebenheiten ist somit bis heute nicht möglich. Eine der größten Schwierigkeiten ist hierbei, dass die spektrale Empfindlichkeit von der Leuchtdichte selbst abhängig ist und der mesopische Bereich durch den Leuchtdichteübergang vom Tag- zum Nachtsehen und nicht durch ein definiertes Leuchtdichteniveau charakterisiert ist.

Die spektrale Empfindlichkeit im mesopischen Bereich zeichnet sich nach heutigem Verständnis durch das Zusammenspiel der beiden Photo-

rezeptortypen des menschlichen Auges, den Stäbchen und Zapfen, aus. Beide Empfängertypen liefern Signale, die schon in der Netzhaut vorverarbeitet und nach den Eigenschaften Farbe, Kontrast und Bewegung getrennt werden (vgl. VON CAMPENHAUSEN UND KIRSCHFELD 1999 [288]). Diese Aufteilung bleibt auch in den höheren Verarbeitungsstufen erhalten. Da die Ganglienzellen mit der Helligkeitsinformation (Kontrast) in die magnozellularen Schichten des seitlichen Kniehöckers projizieren, wird der achromatische Kanal auch magnozellularer Kanal genannt. Die Farbinformationen werden analog im chromatischen oder parvozellulären Kanal weiterverarbeitet, da die Farbinformationen in den parvozellulären Schichten des seitlichen Kniehöckers weitergeleitet werden.

Je nach Untersuchungsmethodik und -parameter werden die visuellen Informationen durch den einen oder anderen Kanal weitergeleitet, was zu unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeitskurven führt.

Die grundlegenden Untersuchungen dieser Arbeit zur Variation der Umfeldleuchtdichte und des Beobachtungswinkels wurden im Rahmen des europäischen Projektes Mesopic Optimization of Visual Efficiency (MOVE) durchgeführt. Ziel dieses Projektes war es, spektrale Empfindlichkeiten von Testpersonen im mesopischen Bereich des Sehens durch verschiedene Untersuchungsmethoden zu bestimmen und einen Vorschlag zur Bestimmung der mesopischen spektralen Empfindlichkeit zu unterbreiten.

Ausgehend von den grundlegenden Untersuchungen wurde der Einfluss weiterer Parameter auf die spektrale Empfindlichkeit im mesopischen Bereich untersucht.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 wird das visuelle System des Menschen als Grundlage für das Verständnis der auftretenden Ergebnisse beschrieben. Kapitel 3 zeigt den heutigen Stand der Forschung in den diese Arbeit betreffenden Bereichen auf. Anschließend wird in Kapitel 4 die Aufgabenstellung konkretisiert und die Versuchsdurchführung beschrieben. Der Versuchsaufbau mit seinen Komponenten und der notwendigen Kalibrierung ist in Kapitel 5 dargestellt. Nach der Beschreibung der verwendeten statistischen Auswertungsmethoden in Kapitel 6 folgt die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse entsprechend der Untersuchungsparameter in Kapitel 7. In Kapitel 8 wird ein Modell zur Beschreibung der spektralen Empfindlichkeit im mesopischen Bereich vorgestellt. Kapitel 9 gibt abschließend eine Zusammenfassung und einen Ausblick auf weitere Untersuchungen.