

Augenempfindlichkeit im Zwiellicht für Objekte mit schmalen Farbspektrum

Harald Babucke

Studiengang Optoelektronik/Lasertechnik, Hochschule Aalen
<mailto:Harald.Babucke@htw-aalen.de>

Bei nächtlichen Autofahrten arbeitet das Auge im mesopischen (Zwiellicht-) Bereich. Die Standard-Augenempfindlichkeitskurven gelten hier nicht. Aus Spektren der Strahldichten, die nötig sind, um farbige Objekte zu erkennen, erhält man Kurven mit mehreren Maxima. Ergebnisse und Modellierungen bei Hintergrund-Leuchtdichten von 0,01 bis 1 cd/m² werden gezeigt und diskutiert.

1 Einführung

Bei nächtlichen Autofahrten treten heute zunehmend spektral schmalbandige Signale auf, etwa von LEDs in Rückleuchten oder Cockpitbleuchtungen. Bei neueren Studien zeigten sich Schwierigkeiten bei der Modellierung von Ergebnissen [1], [2] mit CIE Standard-Kurven wie $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$.

2 Methoden

Genutzt wird die Inkrement-Schwellen Methode, bei der ein Sehzeichen einem Hintergrund mit definierter Leuchtdichte überlagert wird.

2.1 Versuchspersonen u. Stimuli

Wir zeigen hier Daten von zwei farbtüchtigen Personen (FK, männlich, 22 Jahre, SB weiblich, 39 Jahre alt). Das Farbsehen wurde mit pseudo-isochromatischen Tafeln überprüft. Farbige Sehzeichen (Landolt-Ringe), 2° groß, mit Wellenlängen von 430 bis 675 nm mit Halbwertsbreiten von 8 bis 24 nm wurden beidäugig direkt (mit 0° Exzentrizität) betrachtet. Ein Diaprojektor mit einem Satz von Graufiltern beleuchtete eine mattweiße Projektionswand mit den gewünschten Hintergrund-Leuchtdichten von 0,01, 0,1 und 1 cd/m². Ein DLP Projektor projizierte Landolt-Ringe in 255 Strahldichte-Stufen durch schmalbandige Interferenzfilter (Abb. 1).

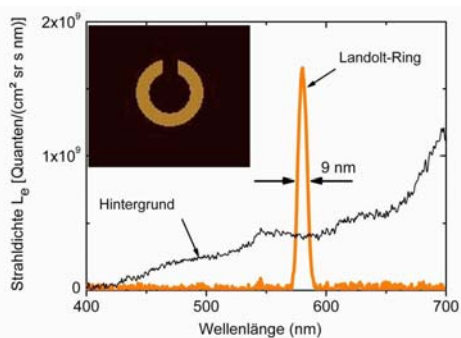


Abb. 1 Beispiel für ein farbiges Sehzeichen (im Einsatz) mit einer spektralen Halbwertsbreite von 9 nm. Seine integrale Strahldichte ist 1,5E10 Quanten/(cm² s sr). Die Hintergrundleuchtdichte ist 0,1 cd/m².

2.2 Verfahren zur Erkenn-Schwellenbestimmung

Jede Messreihe begann nach einer Adaptationszeit von 20 bis 30 min. Pro Tag wurde nur eine Messreihe pro Person aufgenommen. Für jeden Wellenlängenfilter stoppte die Versuchsperson die Projektionssoftware bei der Stufe der Strahldichte, bei der sie die Position der Lücke des Landoltringes erkennen konnte. Bei Fehlern wurde die Schwell-Messung wiederholt. Der Mittelwert der Projektionsstufen aus 6 Beobachtungen wurde berechnet und dann dafür das Spektrum der Strahldichte untergrundfrei (Hintergrundbeleuchtung blockiert) aus der Richtung der Versuchsperson gemessen. Das Hintergrundspektrum wurde separat gemessen.

Die Spektren von Strahldichte und Leuchtdichte wurden mit einem kalibrierten Array Spektrometer gemessen, ausgerüstet mit einer Teleskop-Optik (CAS 140CT und TOP 100 mit 60 mm Objektiv, Instrument Systems GmbH, München). Die Standard-Abweichung für wiederholte Schwell-Messungen war 10...20% mit den größeren Werten für die längeren Wellenlängen.

2.3 Datenanalyse

Die gemessene Schwell-Strahldichte L_e wird in Quanteneinheiten umgerechnet, und $1/L_e$ (als Maß für die Empfindlichkeit) als Funktion der Wellenlänge dargestellt.

Ein theoretisches Modell nach Fulton [5] wird zur Anpassung der Schwell-Daten verwendet. Das Signal wird als Summe der nichtnegativen Beiträge dreier Farbsensoren im Auge (S, M, L) berechnet.

Für die Absorption der Sensoren gilt

$$\alpha(\lambda) = \log(\alpha_S) + \log(\alpha_M) + \log(\alpha_L). \quad (1)$$

Die Absorptionsspektren jedes der Sensoren α_x werden durch Fermifunktionen beschrieben

$$\alpha_x(\lambda) = \frac{1}{\left\{1 + \exp\left[\frac{h \cdot c}{k_B \cdot T} \left(\frac{1}{\lambda_x} - \frac{1}{\lambda_{xs}}\right)\right]\right\}} * \left\{1 + \exp\left[\frac{h \cdot c}{k_B \cdot T} \left(\frac{1}{\lambda_{xl}} - \frac{1}{\lambda_x}\right)\right]\right\}} \quad (2)$$

wobei x jeweils durch S, M oder L ersetzt wird und die Wellenlängen der Halbwerte aus Tab. 1 entnommen werden.

Spektrales Band	λ_{xS} (nm)	λ_{xL} (nm)
s	400	475
m	500	565
l	595	655

Tab. 1 Halbwellenlängen für das Modell der Zapfen-Absorption.

In Gl. (1) ist λ die Wellenlänge, k_B die Boltzmannkonstante, h das Plancksche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit. Für Menschen gilt $T = 310$ K (37 °C) und $k_B \cdot T / (h \cdot c) = 0.0215$.

Weiterhin wird die Absorption der macula lutea [3] modelliert nach [4] gemäß

$$\alpha_{\text{mac}}(\lambda) = \text{abs} \{ 0.32 \cdot \exp[-0.0012(436-\lambda)^2] + 0.32 \cdot \exp[-0.0012(480-\lambda)^2] - 0.123 \cdot \exp[-0.0012(458-\lambda)^2] + 0.12042 \cdot \exp[-0.006(457-\lambda)^2] \}. \quad (3)$$

Der Parameter "abs" dient zur Anpassung der individuellen macula-Absorption.

3 Ergebnisse

Abb. 2 zeigt reziproke Erkenschwellen für eine Versuchsperson mit bis zu drei Maxima und ein Minimum nahe 460 nm. Bei geringerer Hintergrund-Leuchtdichte werden weniger Photonen zum Erkennen benötigt, besonders im blauen und grünen Bereich.

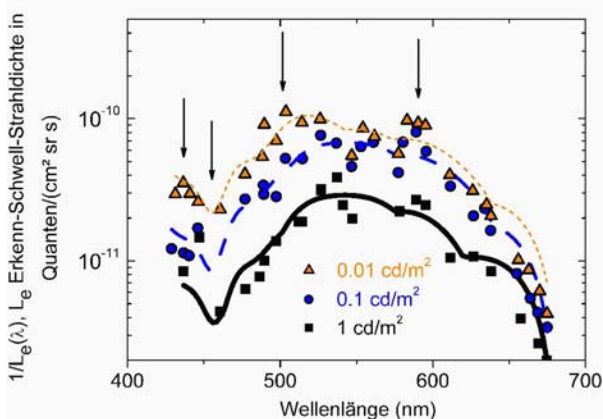


Abb. 2 Reziproke Erkenschwellen für drei verschiedene Hintergrund-Leuchtdichten gemessen an Person SB, mit bis zu drei Maxima und einem Minimum (Pfeile).

4 Diskussion

Die Daten sind gut mit einem Modell nach Fulton [5] beschreibbar, wenn die Absorption der macula lutea zusätzlich berücksichtigt wird. Stäbchen (die im Zentrum der fovea fehlen und langsamer rea-

gieren), sowie Farb-Opponent Prozesse wie |L-M| werden nicht berücksichtigt. Alternative Multi-Peak-Modelle, entwickelt für Exzentrizitäten von 10°[1] oder 5°[6] die u. a. die hier ungünstigen $V'(\lambda)$ und $V(\lambda)$ sowie Tabellen von empirischen Zapfempfindlichkeiten nutzen können diese Messdaten nicht so gut wiedergeben (Abb. 3).

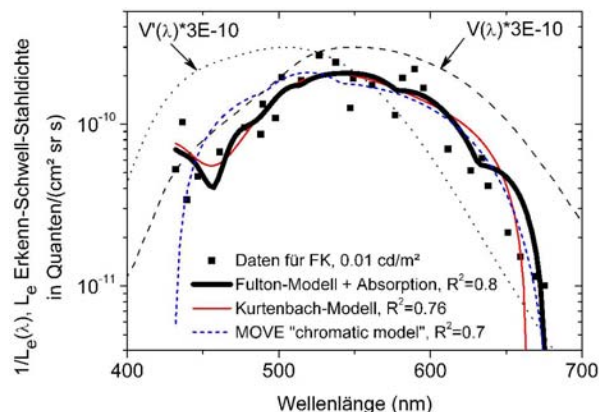


Abb. 3 Vergleich der Messdaten für Person FK (22 Jahre) mit verschiedenen Modellen. Die beste qualitative und quantitative Anpassung (größeres R^2) gelingt mit dem Modell nach Fulton.

Das Modell nach Fulton nutzt sechs Halb-Wellenlängen und Konstanten und ist daher viel leichter handhabbar als empirische Modelle aus bis zu fünf empirischen Kurven [1].

Literatur

- [1] M. Eiloholma, L. Halonen, "MOVE- Mesopic Optimization of Visual Efficiency. Performance based model for mesopic photometry," *Report 35*, HUT Lighting Laboratory, Espoo, Finland, ISB N 951-22-7566-X (2005).
- [2] G. Várady, A. Freiding, M. Eiloholma, L. Halonen, H. Walkey, T. Goodman, J. Alferdinck, "Mesopic visual efficiency III: Discrimination threshold measurements," *Lighting Research and Technology* **39**, 355-364 (2007).
- [3] R.A. Bone, J.T. Landrum, and A. Cains, "Optical density spectra of the macular pigment *in vivo* and *in vitro*," *Vision Research* **32**, 105-110 (1992).
- [4] P.L. Walraven, CIE report of TC 1-36, **CIE 170-1** "Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1; (2006).
- [5] J.T. Fulton, Kap. 17, "Performance descriptors of Vision" in *Processes in biological vision: including, electrochemistry of the neuron*, (2007), Gleichung 17.2.2-4, p. 109, erhalten von <http://4colorvision.com/pdf/17Performance1a.pdf>, April 2007.
- [6] A. Kurtenbach, S. Meierkord, J. Kremers, "Spectral sensitivities in dichromats and trichromats at mesopic retinal illuminances," *J. Opt. Soc. Am. A* **16**(7), 1541-1548 (1999).