

Erkennschwellen in der Dämmerung für Objekte mit schmalem Farbspektrum bei 0° bis 20° retinaler Exzentrizität

Ines Horsthemke-Eckhardt, Dr. Harald Babucke, Karen Meyer, Anna-Barbara Schönwälder, Prof. Dr. Kunibert Krause

Hochschule Aalen, Fakultät Optik und Mechatronik, Beethovenstr. 1, 73430 Aalen

1. Hintergrund

Bei nächtlichen Autofahrten arbeitet das Auge im mesopischen (Dämmerungs-) Bereich. Die standardisierten CIE Augenempfindlichkeitskurven $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$ gelten hier nicht [1], weder für schmalbandige Objekte [2] noch für Erkennschwellen, egal ob unter mesopischen [3], photopischen [4],[5],[6] oder skotopischen [7],[8] Bedingungen. Lichtquellen mit schmalen Farbspektren wie beispielsweise Leuchtdioden sind in vielen Farben verfügbar und werden für Fahrzeug-Rücklichter, Anzeigen im Cockpit oder Lichtsignalanlagen genutzt.

Der Einfluss der Stäbchen sollte geklärt werden. Dazu wurde zum einen in der stäbchenfreien Zone durch Verwendung kleiner 0,6°-Targets und bei direktem Sehen (unter 0° retinaler Exzentrizität) gemessen. Zum anderen wurde der Netzhautbereich mit der maximalen Stäbchendichte bei peripherem Sehen (bei 20° Exzentrizität) genutzt. Erstaunlicherweise können alle hier gefundenen Effekte sehr gut ohne die Berücksichtigung von Stäbchen erklärt werden.

2. Methode

Es wird die Inkrement-Schwellen Methode genutzt, bei der ein Sehzeichen einem weißen Hintergrund mit definierter Leuchtdichte ($0,1 \text{ cd/m}^2$) überlagert wird.

2.1 Versuchspersonen und Stimuli

Es werden hier Daten von sechs farbtüchtigen Personen im Alter von 24 bis 46 Jahren gezeigt, deren Farbsehen mit pseudo-isochromatischen Tafeln überprüft wurde [9],[10].

Farbige Sehzeichen (Landolt-Ringe), 2° und $0,6^\circ$ groß, mit Wellenlängen von 433 bis 678 nm und Halbwertsbreiten von ≤ 10 nm wurden beidäugig betrachtet bei 0° und 20° retinaler Exzentrizität. Eine Xenon-Kurzbogenlampe (Osram XBO 75 W/2) beleuchtete eine mattweiße Projektionswand. Mit Graufiltern wurde die gewünschte Hintergrund-Leuchtdichte von $0,1 \text{ cd/m}^2$ eingestellt. Ein DLP-Projektor (Kindermann KX 150) projizierte Landolt-Ringe in 255 Strahldichte-Stufen durch schmalbandige Interferenzfilter.

2.2 Ablauf der Erkenschwellen-Bestimmung

Jede Messreihe begann nach einer Adaptationszeit von 20 min. Pro Tag wurde nur eine Messreihe je Person aufgenommen. Die Sehzeichen wurden mit schrittweise zunehmender Strahldichte jeweils 0,5 s lang dargeboten. Für jeden Wellenlängenfilter stoppte die Versuchsperson die Projektion 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 5 Beobachtungen wurde berechnet und das Spektrum der Strahldichte untergrundfrei (bei blockierter Hintergrundbeleuchtung) 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 UV-VIS und TOP100 mit 105mm-Objektiv, Instrument Systems GmbH, München). Die Standard-Abweichung für wiederholte Schwell-Messungen lag unter 20% mit den größeren Werten für die längeren Wellenlängen. Die Messeinrichtung für die Strahldichte und Leuchtdichte war mit einem Fehler von 5 % kalibriert.

Bei den Wellenlängen, bei denen der DLP-Projektor hohe Strahldichten liefert und dadurch den Kontrast verringert, wurden zusätzliche Graufilter in den Strahlengang gebracht, und zwar so lange, bis die Erkennungsschwellen nicht mehr beeinflusst wurden [11].

2.3 Datenanalyse

Die Augen-Empfindlichkeiten werden berechnet aus den reziproken Strahldichten, die nötig sind, um die farbigen Objekte zu erkennen. Dabei entstehen Kurven mit mehreren Maxima. Die gemessene Schwell-Strahldichte L_e wird dazu in Quanteneinheiten umgerechnet und anschließend die reziproke Leuchtdichte $1/L_e$ als Funktion der Wellenlänge dargestellt.

Ein modifiziertes [12] theoretisches Modell nach Fulton [13] wird zur Anpassung der Erkenn-Schwell-Daten verwendet. Das Signal wird als Summe der nichtnegativen Beiträge dreier Farbsensoren im Auge (S, M, L) berechnet. Zusätzlich wird die Absorption der macula lutea [14] berücksichtigt [15].

Das Modell wird vereinfacht beschrieben durch die Formel

$$\frac{1}{L_e(\lambda)} = (1 - \alpha_{\text{mac}}) * [\ln(\alpha_S) + \ln(\alpha_M) + \ln(\alpha_L)] \quad (1)$$

Dabei ist α_{mac} das Makula-Absorptionsspektrum, α_S , α_M , und α_L sind die Absorptionsspektren der drei Zapfen S, M, L. Weitere Details finden sich in [12] und [13].

Mit den Anpass-Parametern sieht diese Formel wie folgt aus:

$$\frac{1}{L_e(\lambda)} = (1 - \text{abs} * \alpha_{\text{mac}}) * \text{KG} * [\text{KS} * \ln(\alpha_S) + \text{KM} * \ln(\alpha_M) + \text{KL} * \ln(\alpha_L)]. \quad (2)$$

Der Koeffizient KG dient hier zur Anpassung des mittleren Signalniveaus. KS, KM und KL sind die Koeffizienten für die Beiträge der drei Zapfen.

3. Ergebnisse

3.1 Erkensschwelen für direktes Sehen

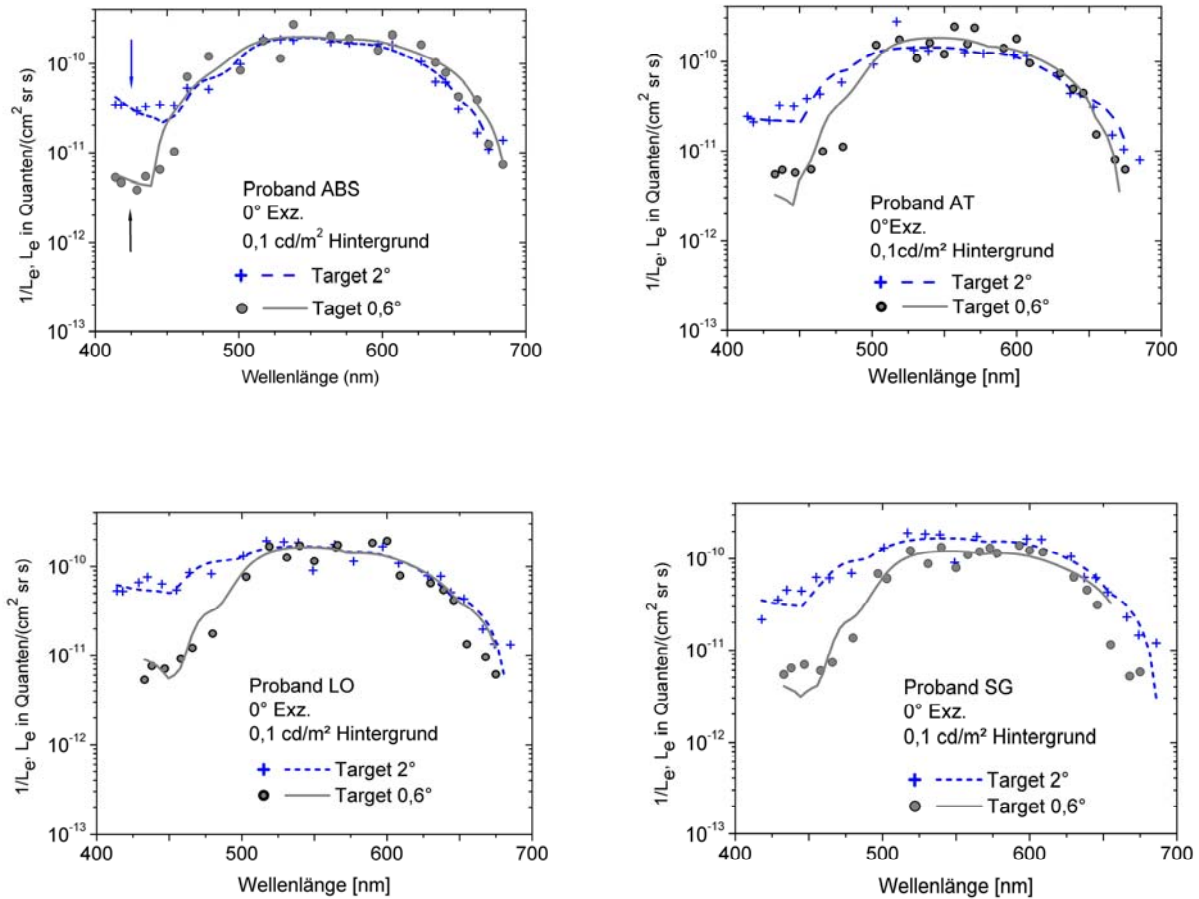


Abb. 1 Empfindlichkeiten aus Erkensschwelen für zwei Targetgrößen, gemessen an vier Probanden bei 0° retinaler Exzentrizität und einer Hintergrundleuchtdichte von 0,1 cd/m². Die Kurven wurden angepasst mit dem Modell nach Fulton. Für die kleineren Targets sinkt die Empfindlichkeit besonders im blauen Bereich (Pfeile).

Abb. 1 zeigt die Empfindlichkeiten aus Erkenschwelen für die kleinen 0,6°-Targets (Kreissymbole) und für die 2°-Targets (Kreuze), zusammen mit den Anpassungen mit einem Modell nach Fulton. Bei allen vier Probanden sinkt im blauen Bereich der Wert von $1/L_e$. Das bedeutet, dass die Empfindlichkeit des Auges deutlich abnimmt, wenn die Targets kleiner werden.

3.2 Erkensschwelen für peripheres Sehen

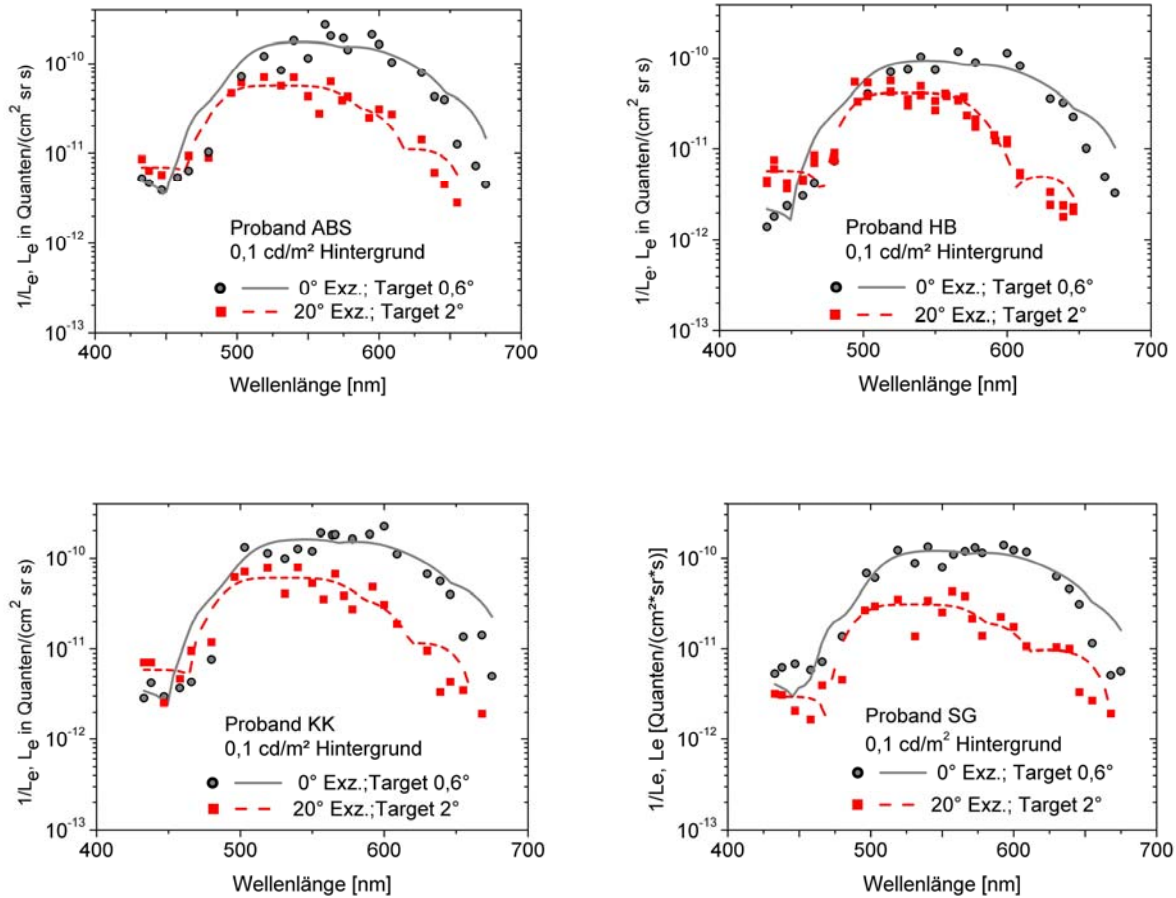


Abb. 2 Empfindlichkeiten aus Erkensschwelen für retinale Exzentritäten von 0° (Punkte) und 20° (Quadrate) bei einer Hintergrundleuchtdichte von 0,1 cd/m². Die Kurven wurden angepasst mit dem Modell nach Fulton. Bei der größeren retinalen Exzentrität nimmt die Empfindlichkeit ab und das Maximum verschiebt sich vom gelben Bereich nahe 600 nm in den blaugrünen Bereich nahe 520 nm.

Abb. 2 zeigt Empfindlichkeiten aus Erkenschwelen für die kleinen 0,6°-Targets (Kreis-symbole) bei 0° retinaler Exzentrität und für die 2°-Targets bei 20° Exzentrität (Quadrate), zusammen mit den Anpassungen mit einem Modell nach Fulton. Die Empfindlichkeit sinkt mit wachsender Exzentrität und die Maxima verschieben sich aus dem gelben in den blaugrünen Bereich.

3.3 Interpersonelle Streuung

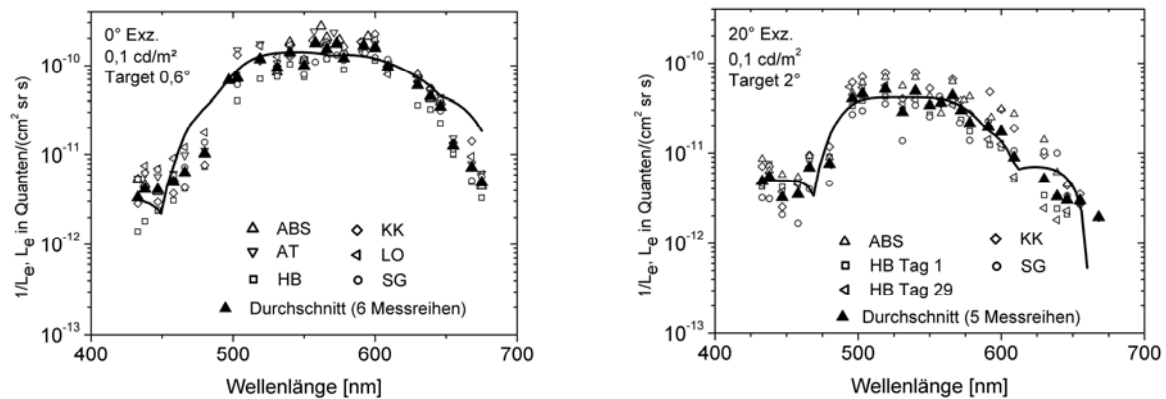


Abb. 3 Mehrere Messreihen zu den Erkenschwellen bei retinalen Exzentrizitäten von 0° (links) und 20° (rechts) und der Hintergrundleuchtdichte von $0,1 \text{ cd/m}^2$ in je einem Diagramm verdeutlichen die Zunahme der Streuung für periphere Messungen (rechts).

In Abb. 3 ist zu erkennen, dass die interpersonelle Streuung bei größerer Exzentrizität zunimmt. Der Unterschied wird besonders im roten Bereich deutlich.

4. Diskussion

4.1 Einfluss der Targetgröße bei direktem Sehen und Modellierung nach Fulton

Der auffälligste Effekt bei den Erkenschwellen für die kleineren $0,6^\circ$ -Targets im Vergleich zu den 2° -Targets ist die Abnahme der Empfindlichkeit in blauen Bereich (Abb. 1). Dies wird im Rahmen des Modells nach Fulton widergespiegelt durch eine Abnahme des Koeffizienten KS für den S-Zapfen (vgl. Tabelle 1 und Gl. (2)).

Die geringere Rolle der S-Zapfen bei den kleinen Targets ist verständlich, da bis $0,35^\circ$ retinaler Exzentrizität keine S-Zapfen vorhanden sind und deren Dichte nach Außen hin bis $0,8^\circ$ zunächst zunimmt (vgl. Fig. 8 in [16]).

Außerdem nimmt die Rolle der Makula-Absorption deutlich zu. Das ist ebenfalls zu erklären, da nach [17] diese Absorption nahe $0,5$ bis 1° maximal ist und dann zur Peripherie hin abnimmt (Tabelle 1).

Tabelle 1 Modell-Koeffizienten KS für den S-Zapfen und abs für die Makula-Absorption bei den beiden Targetgrößen 2° und $0,6^\circ$ für die vier Probanden aus Abb. 1. Außerdem ist das Verhältnis der Koeffizienten angegeben.

	Proband			
Modell-Paramter	ABS	AT	LO	SG
KS(2°)	40 ± 30	6 ± 8	78 ± 120	20 ± 30
abs (2°)	$1,5 \pm 0,7$	$0,5 \pm 1,0$	$0,9 \pm 0,7$	$1,0 \pm 0,7$
KS($0,6^\circ$)	2 ± 3	2 ± 8	7	4 ± 10
abs ($0,6^\circ$)	$2,1 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,7$	$2,5 \pm 0,7$	$2,5 \pm 0,5$
KS(2°)/KS($0,6^\circ$)	20	3	11	5
abs (2°)/abs ($0,6^\circ$)	0,7	0,2	1,3	0,4

Aus Abb. 2 lässt sich ableiten, dass die S-Zapfen bei den größeren 2° -Targets und 20° Exzentrizität merklich zur Empfindlichkeit beitragen, in drei von vier Fällen ist diese im blauen Bereich höher als bei den kleinen $0,6^\circ$ -Targets in 0° Exzentrizität.

Die deutlich verstärkte interpersonelle Streuung im roten Bereich bei 20° Exzentrizität gegenüber 0° Exzentrizität ist überraschend (Abb. 3) und schon in den Kurven in Abb. 2 erkennbar. Viele verkehrsrelevante Beleuchtungen liegen in diesem Bereich.

Tabelle 2 Anpassparameter KM und KL sowie deren Quotient KM/KL für die vier Probanden aus Abb. 2. Es werden jeweils die Werte für die beiden Exzentrizitäten 0° und 20° angegeben.

	Proband			
Modell-Parameter	ABS	HB	KK	SG
KM (0°)	34050	33550	33330	81190
KM (20°)	1110	274	1220	485
KL (0°)	21	28	39,6	41
KL (20°)	4,2	2,1	4,1	7,3
KM(0°) / KL (0°)	1600	1200	842	1980
KM (20°) / KL (20°)	20	130	298	66

Die Tabelle 2 verdeutlicht, dass die Veränderung im Rahmen des Modells vor allem durch das Verhältnis KM/KL des Beitrages vom M-Zapfen relativ zum L-Zapfen bestimmt wird. Dieses Verhältnis KM/KL nimmt mit wachsender Exzentrizität deutlich ab. Im Rahmen dieses Modells gibt es die größte Änderung in dem Bereich, in dem die Beiträge beider Zapfen überlappen und sich auch das Maximum der Empfindlichkeit für 0° Exzentrizität befindet.

Wie in Abb. 1 klar erkennbar ist, spielt die Größe der Targets dafür keine Rolle. Es ist eine reine Auswirkung der Exzentrizität.

4.2 Vergleich mit dem chromatischen Modell

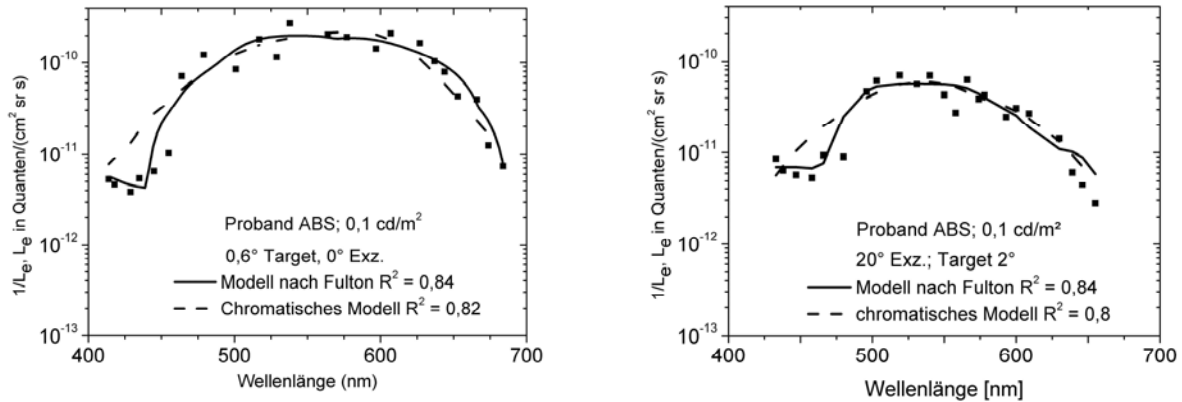


Abb. 4 Anwendung von zwei Modellen auf die Messwerte eines Probanden für 0° Exzentrizität (links) und 20° (rechts). Das chromatische Modell berücksichtigt im Unterschied zum Modell nach Fulton zusätzlich durch $V'(\lambda)$ den Einfluss der Stäbchen. Das Bestimmtheitsmaß der Anpassung R^2 ist für beide Modelle ähnlich, das Modell nach Fulton passt qualitativ und quantitativ besser.

Das chromatische Modell [2],[18] verwendet im Unterschied zum Modell nach Fulton zusätzlich die $V'(\lambda)$ Funktion um den Einfluss der Stäbchen zu berücksichtigen. Das chromatische Modell wird durch die folgende Formel beschrieben:

$$(1/L_e) = a_0 * (a_1 * V(\lambda) + a_2 * V'(\lambda) + a_3 * |L(\lambda) - a_4 * M(\lambda)| + a_5 * S(\lambda)) \quad (3)$$

Der Parameter a_0 dient hier zur Skalierung und ist im ursprünglichen Modell noch nicht enthalten, da dieses mit normierten Daten arbeitet. Für $L(\lambda)$, $M(\lambda)$ und $S(\lambda)$ wurden hier wir hier die Zapfen-Funktionen nach Stockman und Sharpe [19] sowie Stockman, Sharpe und Fach [20] verwendet.

Das Bestimmtheitsmaß der Anpassung R^2 (oder coefficient of determination) ist für beide Modelle ähnlich gut, das Modell nach Fulton passt qualitativ und quantitativ besser.

Weder aus den Daten allein noch aus den Anpassungen lässt sich ein Einfluss der Stäbchen belegen.

4.3 Einfluss der Darbietungsfrequenz

Es ist seit längerem bekannt [21],[5], dass die Spektren der Empfindlichkeiten aus Erkenschwellen stark von der Frequenz abhängen, mit denen die Stimuli dem Beobachter präsentiert werden. Bei 1Hz finden sich 3-Peak-Kurven, bei 25 Hz dagegen eine Kurve mit

nur einem Maximum nahe 520 nm, die auch nicht von der Farbtemperatur des Hintergrundes abhängt [21].

Für die Kurven bei 1 Hz diskutieren die Sharanjeet-Kaur u.a. [21] einen (L+M) - S Prozess. Unsere Versuche, die hier vorliegenden Daten mit dem chromatischen Modell anzupassen, gaben keinen Hinweis auf solch einen Prozess.

4.4 Einfluss der Targetgröße

Mehrere Maxima der Empfindlichkeiten aus photopischen Erkennschwellen werden für direktes Sehen nur gefunden, wenn die Stimuli lang genug (20 ms) und groß genug sind (1°) [5]. Für 20° Exzentrizität müssen sie etwa 2° groß sein [22]. Andernfalls verschwindet bei wachsender Exzentrizität zunächst das Maximum nahe 600 nm, später jenes nahe 450 nm [5], [22].

Wenn das Stäbchen-System eine geringere räumliche Auflösung besitzt als das Zapfen-System, muss möglicherweise bei größeren Targets nach dem Einfluß der Stäbchen gesucht werden.

5. Schlussfolgerung

Verkehrsrelevante Beleuchtungen sollten breitbandige (400 bis 650nm) und ausgedehnte Quellen ($\geq 2^\circ$) nutzen, die auch im blauen Bereich emittieren. Bei Rückleuchten ist zu empfehlen, sie möglichst Orange statt Rot zu gestalten, so weit wie es gesetzlich erlaubt ist.

Es wurde nicht klar, ob die Stäbchen für die mesopischen Erkennschwellen bei kleinen schmalbandigen Targets eine Rolle spielen. Dazu wäre eine direkte Vergleichsmessung der Erkenn-Schwellen von Stäbchen-Monochromaten nützlich.

6. Literatur

- [1] K. Sagawa, Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any level including mesopic vision, *Ophthal. Physiol. Opt.* **26**, 240-245, (2006).
- [2] M. Eloholma, Development of visual performance based mesopic photometry, doctoral thesis, *Report 36*, Helsinki University of Technology, Lighting Laboratory, Otamedia Oy, Espoo, Finland, ISB N 951-22-7868-5 (2005), p.27, p.39.
- [3] G. Várady, A. Freiding, M. Eloholma, L. Halonen, H. Walkey, T. Goodman, J. Alferdinck, Mesopic visual efficiency III: Discrimination threshold measurements, *Lighting Research and Technology* **39**, 355-364 (2007).
- [4] H.G. Sperling, R.S. Harwerth, Red-green cone interactions in the increment-threshold spectral sensitivity of primates, *Science* **172**, 180-184 (1971).
- [5] P.E. King-Smith and D. Carden, Luminance and opponent-color contributions to visual detection and adaptation and to temporal and spatial integration. *J. Opt. Soc. Am. A* **66**, 709-717 (1976).
- [6] K. Kranda, P.E King-Smith, Detection of coloured stimuli by independent linear systems, *Vision Res.* **19**, 733-745 (1979).
- [7] Y. Hsia, C.H. Graham, Spectral Sensitivity of the Cones in the Dark Adapted Human Eye, *Proc. Natl. Acad. of Sci. of the USA* **38**, 80-85 (1952).
- [8] Y. Hsia, C.H. Graham, Spectral luminosity curves for protanopic, deuteranopic, and normal subjects, *Proc. Natl. Acad. of Sci. of the USA* **43**, 1011-1019 (1957).
- [9] K. Meyer, Mesopische Erkenschwellen bei 0°, 10° und 20° retinaler Exzentrizität. Bachelor Thesis, Hochschule Aalen, Studiengang Augenoptik (2009).
- [10] A.-B. Schönwälder, Erkenschwellen im mesopischen skotopischen und photopischen Bereich, Bachelor Thesis, Hochschule Aalen, Studiengang Augenoptik (2009).
- [11] I. Horsthemke-Eckhardt, Erkenschwellen für kleine Targets bei mesopischen Hintergrundleuchtdichten, Bachelor Thesis, Hochschule Aalen, Studiengang Augenoptik (2009).

- [12] H. Babucke, Augenempfindlichkeit im Zwielicht für Objekte mit schmalem Farbspektrum, DGaO Proceedings, Esslingen, ISSN 1614-8436, http://www.dgao-proceedings.de/download/109/109_a20.pdf, (2008).
- [13] J.T. Fulton, Chapter 5, The Photochemistry of Animal Vision, Table 5.5.10-1 on p.80, in Processes in biological vision: including, Electrochemistry of the neuron (2005); retrieved from www.sightresearch.net/pdf/5Photochem.pdf in feb. 2009.
- [14] 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).
- [15] P.L. Walraven, CIE report of TC 1-36, **CIE 170-1** Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1; (2006).
- [16] C.A. Curcio, K.A. Allen, K.R. Sloan, C.L. Lerea, J.B. Hurley, I.B. Klock, and A.H. Milam, Distribution and morphology of human cone photoreceptors stained with anti-blue opsin, J. Comp. Neurol. **312**, 610-624 (1991).
- [17] T.T.J.M. Berendschot, and D. van Norren, Macular Pigment Shows Ring-like Structures, Investigative Ophthalmology & Visual Science **47**(2), 709-714 (2006).
- [18] T. Goodman, A. Forbes, H. Walkey, M. Eloholma, L. Halonen, J. Alferdinck, A. Freiding, P. Bodrogi, G. Várady, and A. Szalmas, Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to nighttime driving and other applications, Lighting Research and Technology **39**, 365-392 (2007). For the chromatic model see equation (11).
- [19] A. Stockman and L.T. Sharpe, Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype, Vision Research **40**, 1711-1737 (2000).
- [20] A. Stockman, L.T. Sharpe, and C.C. Fach, The spectral sensitivity of the human short-wavelength cones, Vision Research **39**, 2901-2927 (1999).
- [21] Sharanjeet-Kaur, J.J. Kulikowski and V. Walsh, The detection and discrimination of categorical yellow, Ophthalmic Physiol. Opt. **17**, 32-37 (1997).
- [22] T.K. Kuyk, Spectral sensitivity of the peripheral retina to large and small stimuli, Vision Res. **22**, 1293-1297 (1982).