

Energieeffizienz mit mehr Blau im Spektrum – eine Lösung mit Fallstricken!

Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz

TU Ilmenau, Fakultät Maschinenbau, FG Lichttechnik, PF 100565, 98684 Ilmenau

christoph.schierz@tu-ilmenau.de

1. Einleitung

Je dunkler die Umgebung wird, auf welche das Auge adaptiert, desto bedeutsamer werden für den Sehvorgang die lichtempfindlichen Stäbchen im Vergleich zu den Zapfen. Ihre unterschiedliche spektrale Absorption verschiebt damit die spektrale Hellempfindlichkeit kontinuierlich von der photopischen 2° -Empfindlichkeit $V(\lambda)$ zur skotopischen Empfindlichkeit $V'(\lambda)$, das heißt, zum blauen Bereich des Spektrums (Purkinje-Effekt). Beim mesopischen Bereich, etwa zwischen $0,01 \text{ cd/m}^2$ und 3 cd/m^2 , ist die spektrale Empfindlichkeit zwischen diesen beiden Extremen $V(\lambda)$ und $V'(\lambda)$. Seit kurzem hat ein technisches Komitee der CIE eine variable spektrale Hellempfindlichkeit $V_{\text{mes}}(\lambda, m)$ festgelegt, wobei der Parameter m die Ähnlichkeit mit $V(\lambda)$ bestimmt ($m=0$ skotopisch, $m=1$ photopisch).

Enthält ein Lichtspektrum geringe Blauanteile, wird es beim Wechsel zum Stäbchensehen weniger effizient bezüglich Helligkeitswahrnehmung. Im skotopischen Fall vollständiger Dunkeladaptation reduziert sich bei Natriumdampf-Niederdrucklampen die Effizienz auf 25%, bei Natriumdampf-Hochdrucklampen (HS) auf 60% (sog. „S/P-Verhältnis“). Bei Quecksilberdampf-Hochdrucklampen gibt es keine Veränderung (100%), bei warmweißen Halogenmetallampfen (HIT) eine Erhöhung auf 120% und bei tageslichtweißen HIT sogar auf 240%. Im mesopischen Fall liegen alle Werte aber näher bei 100%.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet im mesopischen Bereich ist die Straßenbeleuchtung. Es werden nun Zweifel geäußert, ob die bisherigen Normen zur Straßenbeleuchtung, welche auf der Photometrie mit $V(\lambda)$ beruhen, noch verlässliche Vorgaben liefern. Da weißes Licht (z.B. HIT) einen höheren Blauanteil enthält als gelbes Licht (z.B. HS), spricht es die Stäbchen bei gleicher Leuchtdichte stärker an. Es wird daher spekuliert, dass man mit einem „mesopisch angepassten“ Spektrum die Normwerte für (photopische) Beleuchtungsstärken zur Effizienzverbesserung unterschreiten könnte.

2. Aufgaben und Eigenschaften der Zapfen und Stäbchen

Um solche Spekulationen beurteilen zu können, wollen wir uns in Erinnerung rufen, wozu die Straßenbeleuchtung gedacht ist und welche Basisuntersuchungen ihren Normen zu Grunde liegen. Generell ist das Ziel der meisten Anwendungsnormen zu beschreiben, wie die Beleuchtung dem komfortablen, genauen, sicheren und schnellen Sehen von tätigkeitsrelevanten Objekten am besten dienen kann. Weitere Aspekte wie etwa nicht-visuelle oder gestalterische Licht-Wirkungen sind noch nicht ins Normenwerk eingeflossen (und sollen es auch nicht unbedingt). Anwendungsnormen arbeiten oft mit Grenzwerten, die sich auf wissenschaftliche Untersuchungen abstützen, aber „politisch“ festgelegt wurden. „Politisch“ deswegen, weil es nicht Aufgabe der Wissenschaft ist, festzulegen welcher Komfort, welche Genauigkeit oder welche Sicherheit mit den zur Verfügung stehenden Mitteln in der jeweiligen Situation erwünscht sein soll.

Die genannten Kriterien für gute Sehleistung werden im Allgemeinen mit messbaren Größen operationalisiert. Wir kennen die Reaktionszeit, die Kontrastschwelle, die Sehschärfe, aber auch die Farbwiedergabe oder die Blendungsbegrenzung. Die unterschiedlichen Eigenschaften von Zapfen und Stäbchen bedingen nun, dass diese Größen im mesopischen Bereich von Leuchtdichteänderungen unterschiedlich stark betroffen sind. So befinden

sich die Zapfen hauptsächlich im Bereich der Fovea, der Stelle des schärfsten Sehens, die Stäbchen aber eher 20 Sehinkelgrade neben der Blickrichtung (Abb. 1 links). Um im Straßenverkehr etwas scharf, mit hoher Sehschärfe sehen zu können, sind daher die Zapfen bedeutsam und die Stäbchen müssen erst bei sehr dunklen Umgebungen „einspringen“ (Abb. 1 rechts). Es ist daher sinnvoll, für den Parameter „Sehschärfe“ auch im mesopischen Bereich bei der photopischen $V(\lambda)$ -Kurve zu bleiben.

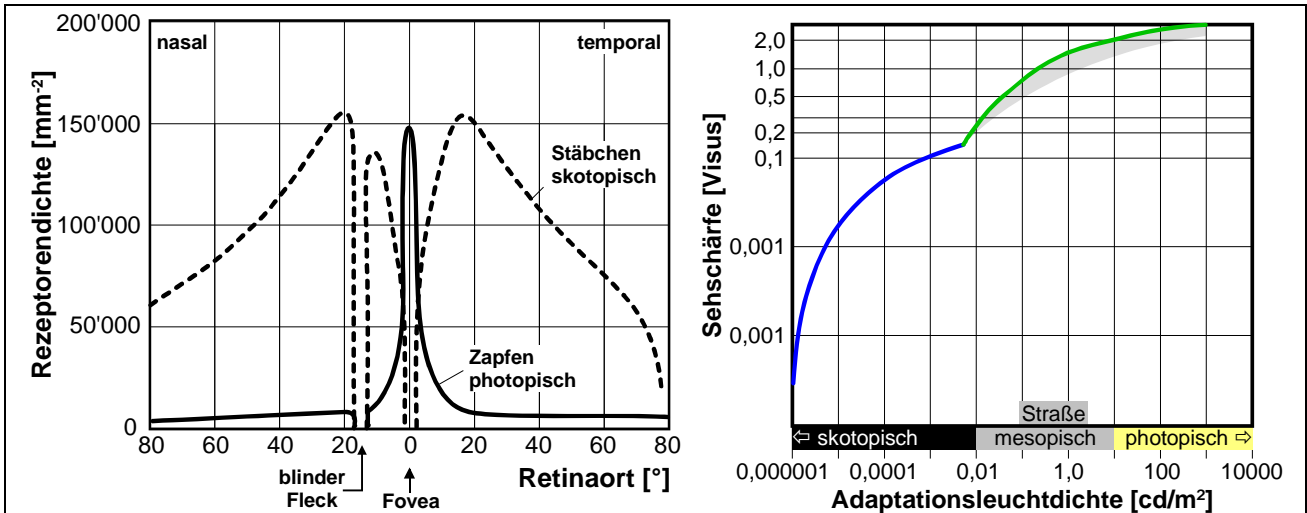


Abb. 1: Links: Receptordichte in Abhängigkeit des Orts auf der Netzhaut (Winkel bezüglich Blickrichtung) /5/. An der Stelle des schärfsten Sehens (0°) befinden sich die meisten Zapfen. Rechts: Sehschärfe in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte /8/. Der Übergang vom Zapfen- zum Stäbchensehen findet deutlich unter den bei nächtlichen Straßen üblichen Leuchtdichten statt.

Sehr schnelle Ereignisse mit kurzen Reaktionszeiten werden von den Zapfen viel schneller verarbeitet als von den Stäbchen (Abb. 2 links). Ein Unterschied zwischen HS und HIT Lichtquellen ist daher für foveales, zentrales Sehen nicht zu erwarten (Abb. 2 rechts). Erst wenn der Vorteil der Stäbchen zum Tragen kommt, ergibt sich für weißes Licht ein Vorteil: Beim Sehen in der Peripherie wird die Reaktionszeit gegenüber dem fovealen Sehen und gegenüber peripherem Sehen bei gelbem Licht deutlich verkürzt. Dies ist für einen Fahrzeuglenker ein wichtiger Parameter, da er schnell erkennen muss, ob sich Menschen, Tiere oder andere Fahrzeuge von der Seite auf die Straße zu bewegen.

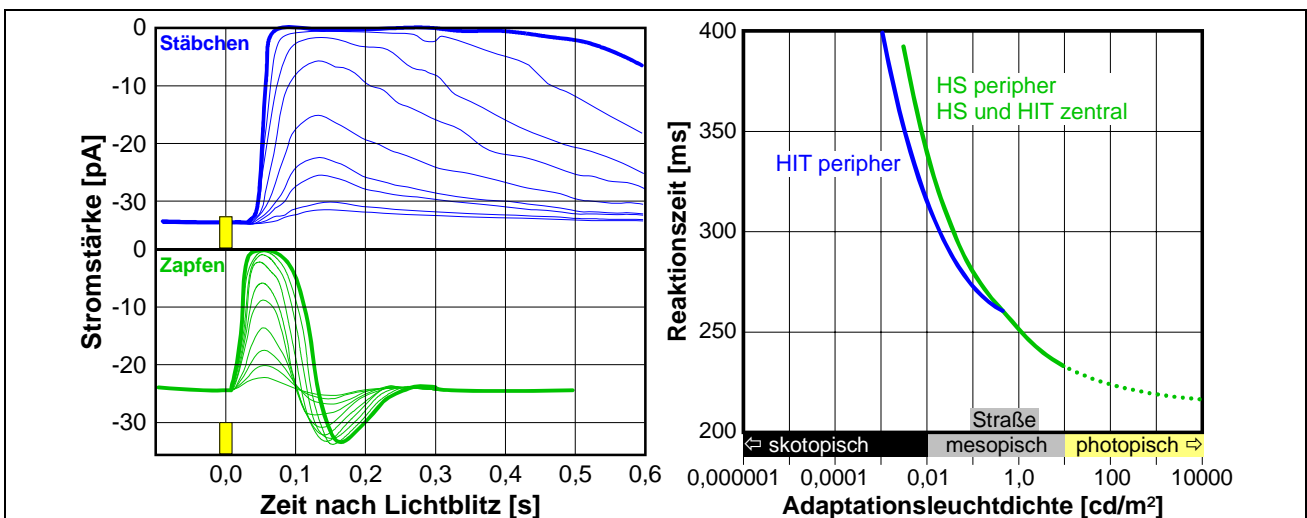


Abb. 2: Links: Membranströme von Stäbchen und Zapfen nach Belichtung durch Lichtblitze verschiedener Intensität beim Affen /7/. Rechts: Reaktionszeiten unter weißem Licht (Metалldampflampen HIT) und gelbem Licht (Natriumdampf-Hochdrucklampen HS) für die Wahrnehmung eines relativ großen Sehobjekts, das sowohl zentral in der Fovea als auch peripher (15° zur Blickrichtung) präsentiert wurde /4/. Nur Sehobjekte in der Peripherie, beleuchtet mit Blauanteil sind auf Stäbchensehen optimiert.

Für den Parameter Reaktionszeit bei peripherem Sehen ist also die mesopische Helligkeitsbewertung mit $V_{\text{mes}}(\lambda)$ (oder mit $V'(\lambda)$) angezeigt, für zentrales Sehen jedoch weniger.

Eine weitere wichtige Aufgabe ist das Erkennen von schwachen Kontrasten, also von Objekten, die sich beinahe nicht von ihrer Umgebung unterscheiden. Diese Aufgabe wird vom Auge nach der Methode „wer zuerst etwas sieht, meldet sich“ gelöst. Das heißt, wenn die Beobachtungssituation die Stäbchen begünstigt (peripher, großflächig, lang andauernd, hoher Blauanteil) werden diese ein Objekt signalisieren, in anderen Fällen (zentral, klein, schnell) sind es die Zapfen (Abb. 3 links). Würde man dieses Prinzip in der Norm berücksichtigen, hieße es, eine Situation sowohl photopisch als auch skotopisch zu messen und für die Bewertung den jeweils kritischeren Wert verwenden.

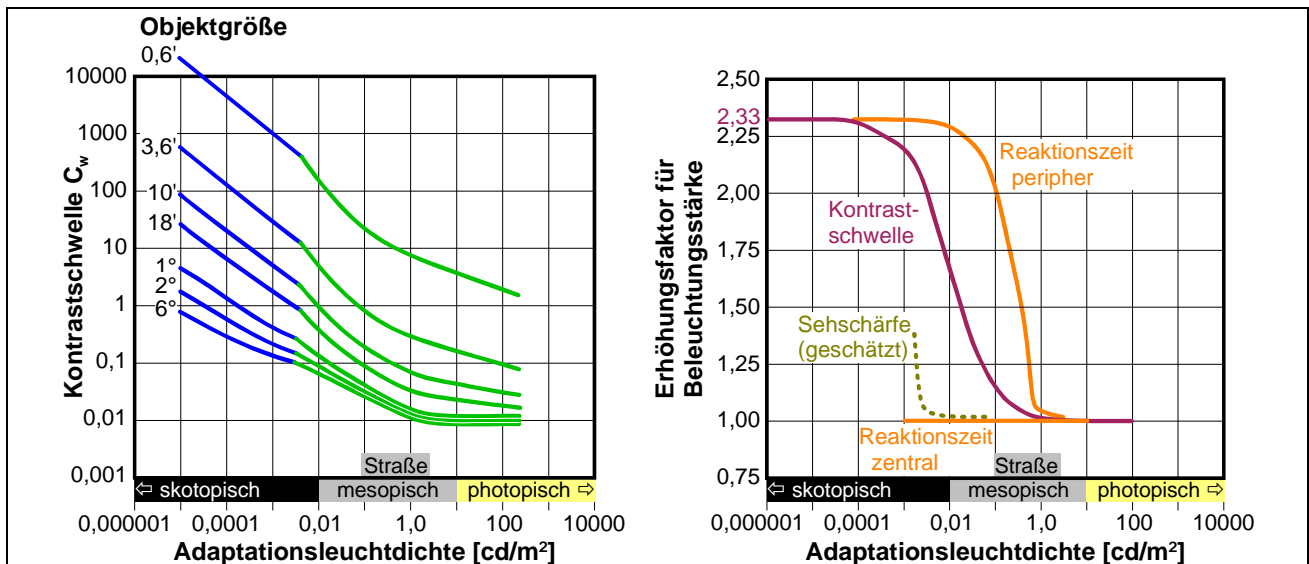


Abb. 3: Links: Bei kleinen Sehobjekten (obere Kurven) liegt der Übergangsbereich vom Zapfen- zum Stäbchensehen deutlich unterhalb des Leuchtdichten für nächtlich beleuchteten Straßen /1/. Bei großen Sehobjekten ist der Übergangsbereich nicht mehr eindeutig auszumachen. Rechts: Erforderlicher Erhöhungsfaktor der Beleuchtungsstärke für Natriumdampf-Hochdrucklampen im Vergleich zu Halogenmetallampfen, zur Erzielung gleicher Sehleistungsgrößen /6/.

Weitere Größen wie etwa die Farberkennung oder die Blendungsbegrenzung müssten auch unter diesen Aspekten überprüft werden. Da nur die Zapfen Farbinformation vermitteln können, wird auch hier die photopische Bewertung die Methode der Wahl sein. Bei der Blendungsbegrenzung zeichnet sich ab, dass sowohl Zapfen wie auch Stäbchen zur Blendungsempfindung beitragen können /3/. Für genauere Aussagen sind aber noch weitere Untersuchungen erforderlich.

3. Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit ging es nicht darum, festzustellen ob gelbes oder weißes Licht besser für Straßenbeleuchtung geeignet ist, sondern darum, Aussagen über die bei der Bewertung zu wählende spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion zu treffen. Die Norm schreibt derzeit vor, photopisch zu messen, was – wie gezeigt – offenbar auch im mesopischen Bereich Sinn machen kann. Es ist wiederum eine „politische“ Entscheidung, welche Parameter mit welchem Gewicht in eine Bewertung einfließen.

Zur Frage, ob mit weißem („blau angereichertem“) Licht die Energieeffizienz erhöht werden kann ist folgendes zu beachten:

- (a) Die der Normung zu Grunde liegenden Untersuchungen wurden für die Straßenbeleuchtung damals mit weißem Licht durchgeführt (Quecksilberdampf-Hochdrucklampen). Die Natriumdampf-Hochdrucklampe als Referenz zu verwenden, ist daher nicht zulässig.

- (b) Ein Absenken der Mindestwerte für weißes Licht ist nicht angezeigt. Im Gegenteil: Für gelbes Licht müssten die Mindestwerte erhöht werden. Abb. 3 rechts zeigt, dass der Faktor aber nur für die Reaktionszeit in der Peripherie bedeutend ist.
- (c) Verwendet man zur spektralen Bewertung eine andere Kurve als $V(\lambda)$, können nicht die bisherigen auf $V(\lambda)$ beruhenden Grenzwerte der Norm einfach übernommen werden. Sie sind neu zu untersuchen und neu festzulegen.
- (d) Nach dem oben dargelegten, kann die Verwendung einer mesopischen Photometrie gewisse visuelle Parameter benachteiligen (z.B. hohe Geschwindigkeit, hohe Sehschärfe, Farbsehen). Dies ist mit einer Risikoabwägung zu berücksichtigen.
- (e) Intensität, Position im Gesichtsfeld, Dauer und Lichtspektrum bestimmen die Balance zwischen Zapfen und Stäbchen.

In der Innenraumbeleuchtung ist neben der photopischen Bewertung eine neue spektrale Empfindlichkeit hinzugekommen: Die spektrale Strahlungsempfindlichkeit für über das Auge vermittelte biologische unspezifische Lichtwirkungen $s_{\text{biol}}(\lambda)$, die gegenüber $V(\lambda)$ ebenfalls zu kurzen Wellenlängen verschoben ist. Auch hier wird spekuliert, ob damit ein blau angereichertes Spektrum dazu führt, dass die Wartungswerte der Beleuchtungsstärken zur Effizienzsteigerung am Arbeitsplatz unterschritten werden dürfen. Dabei wird besonders das Spektrum von Tageslicht als positives Beispiel hervorgehoben. Hier ist die Situation jedoch anders, weil hier zwei völlig verschiedene Zielgrößen beschrieben werden. Es müssen also jeweils beide Bewertungen durchgeführt werden, wobei man bei bekanntem Spektrum mit einem biologischen Wirkungsfaktor $a_{\text{biol},v}$ die unspezifische Lichtwirkung auch aus der photometrischen Größe bestimmen kann /2/.

7. Literatur

- /1/ Blackwell H.R. (1946): Contrast thresholds of the human eye. *Journal of the Optical Society of America*, V36 N11 P624-643.
- Adrian W. (1989): Visibility of targets: model for calculation. *Lighting Res. Technol.*, V21 P181-188.
- /2/ DIN V 5031-100 (2009): Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren.
- /3/ Fekete J., Sik-Lányi C., Schanda J. (2006): Spectral discomfort glare sensitivity under low photopic conditions. *Ophthal. Physiol. Opt.*, V26 N3 P313-317.
- /4/ He Y., Rea M., Bierman A., Bullough J. (1996): Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times. Thesis at the Rensselaer Polytechnic Institute.
- /5/ Osterberg G. (1935): Topography of the layer of rods and cones in the human retina. *Acta Ophthalmol*, V13 (Suppl. 6) P1-97.
- Curcio C.A., Sloan K.R., Kalina R.E., Hendrickson A.E. (1990): Human photoreceptor topography. *Journal of Comparative Neurology*, V292 P497-523.
- /6/ Rea M.S., Bullough J.D., Freyssinier-Nova J.P., Bierman A. (2004): A proposed unified system of photometry. *Lighting Res. Technol.*, V36 N2 P85-111.
- /7/ Schnapf J.L., Baylor D.A. (1987): Die Reaktion von Photorezeptoren auf Licht. *Spektrum der Wissenschaft*, V10 N6 P116-123.
- /8/ Shlaer S. (1937): The relation between visual acuity and illumination. *Journal of General Physiology*, V21 N2 P165-188.
- Pirenne M.H. (1945): On the variation of visual acuity with light intensity. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, V42 P78-82.