

# Einfluss der melanopsinhaltigen Ganglienzellen auf die kurz- und langzeitige Pupillenlichtreaktion

Babak Zandi, Korbinian Kunst, Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstraße 4a in 64289 Darmstadt

mailto:zandi@lichttechnik.tu-darmstadt.de

Zur Voraussage der Pupillenlichtreaktion existieren in der Literatur vielseitige empirische Modelle, welche vor allem von der Leuchtdichte als photometrische Größe abhängen. Mit der Entdeckung der photosensitiven Ganlienzellen müssen diese Modelle überdacht werden, da es neuere Erkenntnisse zur Funktionsweise des Pupillenverhaltens gibt.

## 1 Einleitung

Die Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges bietet einen hohen Arbeitsbereich und ist in der Lage einzelne Photonen [1] bis hin zu hohen Beleuchtungsstärken bei Tag wahrzunehmen. Diese adaptive Lichtempfindlichkeit wird sowohl durch die chemosensorische Anpassung der Retina als auch die sensomotorische Anpassung mittels der Pupille ermöglicht. Die Pupille bietet im Vergleich zur chemosensorischen Adaptation einen schnellen Schutz der Netzhaut bei Änderungen der Lichtintensität in der Umgebung. Die Öffnungsweite ist zwischen 1.5 mm und 8 mm frei variierbar. Der maximale Durchmesser ist altersabhängig und sinkt mit fortschreitendem Alter [2]. Der Pupillendurchmesser ist ein wichtiger Faktor bei lichttechnischen Untersuchungen, da dieser einen direkten Einfluss auf die retinale Beleuchtungsstärke hat, welche die Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung beeinflusst. Zur Voraussage des Pupillendurchmessers existiert in der Literatur eine große Anzahl von empirischen Modellen. Das älteste Modell stammt von Holladay aus dem Jahr 1926 [3] und basiert auf einer Studie mit drei Probanden unbekanntem Alters und binokularem Sehen (siehe Gl. 1). Weiterführende Modelle wie Crawford 1936, Moon & Spencer 1944, De Groot & Gebhard 1952 haben durch eine größere Stichprobe allgemeingültigere Modelle aufgestellt. Wobei das Modell von Stanley & Davis erstmalig auch die Abhängigkeit der Adaptationsfeldgröße  $\alpha$  als  $\text{deg}^2$  berücksichtigt [4].

Holladay (1926):

$$D_H = 7 \exp[-0.1007L^{0.4}] \quad (1)$$

Crawford (1936):

$$D_C = 5 - 2.2 \tanh[0.61151 + 0.447 \log(L)] \quad (2)$$

Moon & Spencer (1944):

$$D_{MS} = 4.9 - 3 \tanh[0.4 \log(L) - 0.00114] \quad (3)$$

Stanley & Davis (1995):

$$D_{SD}(L, \alpha) = 7.75 - 5.75 \left( \frac{(L \alpha / 846)^{0.41}}{(L \alpha / 846)^{0.41}} \right) \quad (4)$$

In [4] hat Watson im Jahr 2012 die relevanten Pupillenmodelle aufgearbeitet, zusammengefasst und in ein vereinheitlichtes Pupillenmodell  $D_U(L, \alpha, y, e)$  überführt. Das Modell von Watson (siehe Gl. 5, 6) bezieht als abhängige Parameter die Leuchtdichte  $L$ , Größe des Adaptationsfeldes  $\alpha$  in  $\text{deg}^2$ , mono- oder binokulares Sehen  $e$  (0.1 oder 1) und das Alter  $y$  mit ein. Wobei das Referenzalter  $y_0$  bei 28.58 Jahren festgelegt wird.

$$D_U(L, \alpha, y, e) = D_{SD*} + (y - y_0) \cdot [0.02132 - 0.009562 D_{SD*}] \quad (5)$$

$$D_{SD*}(L, \alpha, e) = 7.75 - 5.75 \left( \frac{(L \alpha e / 846)^{0.41}}{(L \alpha e / 846)^{0.41}} \right) \quad (6)$$

Das aktuelle Pupillenmodell hat Defizite, da es keine Zeitabhängigkeit besitzt und zudem von der Leuchtdichte als photometrische Größe abhängt. Die Leuchtdichte ist mit der  $V(\lambda)$ -Kurve gewichtet und bezieht lediglich den achromatischen Helligkeitsskanal mit ein. Untersuchungen bei zapfenlosen Mäusen haben gezeigt, dass eine Kontraktion der Pupille auch ohne Zapfen zu beobachten ist. Verantwortlich für diesen Effekt sind die photosensitiven Ganglienzellen, welche das Photopigment Melanopsin enthalten und nach neueren Erkenntnissen maßgeblich zur Steuerung des Pupillendurchmessers beitragen. Aufgrund der unterschiedlichen Ansprechlatenzen der Zapfen und der ipRGCs ist zudem ein zeitabhängiger Einfluss der individuellen Rezeptortypen belegbar. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht wie groß die Abweichungen des vereinheitlichten Pupillenmodells bei der Verwendung von quasimono- und polychromatischen LED-Spektren sind.

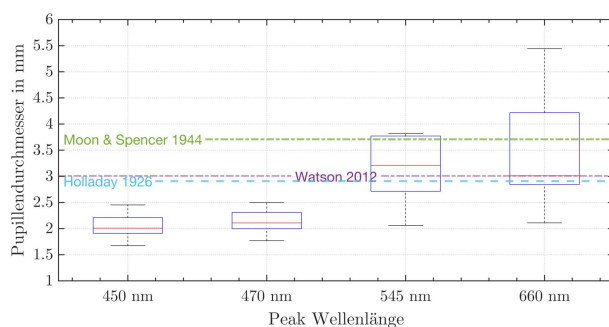
## 2 Methodik

Der Versuch ist aufgeteilt in zwei Abschnitte. Im ersten Versuch A werden vier quasimonochromatische Reizspektren mit einer Peak-Wellenlänge von

450 nm, 470 nm, 545 nm und 660 nm bei einer konstanten Leuchtdichte von  $100 \text{ cd/m}^2$  fünf Minuten dargeboten. Vor jedem Reizspektrum wird zehn Minuten lang ein Ankerspektrum mit einer Farbtemperatur von 2700 K eingeschaltet. Die Stichprobe besteht aus neun Probanden im Alter zwischen 23-30 Jahren. Im zweiten Versuch B werden nacheinander drei polychromatische Spektren entlang des planckschen Kurvenzug mit 10 000 K, 2300 K und  $\text{ipRGC}_{\text{max}}$  fünf Minuten bei einer konstanter Leuchtdichte von  $195 \text{ cd/m}^2$  dargeboten. Die Daten basieren auf einem Probanden im Alter von 31 Jahren mit jeweils 12 Wiederholungen. Der Pupillendurchmesser wird mit einem Stereokamerasystem bei einer Abtastfrequenz von 120 Hz aufgenommen.

### 3 Ergebnisse Versuch A

Nach dem Modell von Watson beträgt der Pupillendurchmesser  $d_p = 2.99 \text{ mm}$  bei  $100 \text{ cd/m}^2$ ,  $\alpha_{\text{grad}} = 53.1^\circ$  und Alter 25 Jahre. Demnach müsste der Pupillendurchmesser konstant und unabhängig von den verwendeten Spektren sein. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung. Dabei ist zu erkennen, dass der Pupillendurchmesser im eingeschwungenen Zustand in der Realität nicht konstant verläuft und sich eine Abweichung zu den Pupillenmodellen ergibt. Zur Darstellung des Pupillendurchmessers wird in Abbildung 1 der gemittelte Pupillendurchmesser der letzten fünf Sekunden eines Reizspektrums verwendet.



**Abb. 1** Ergebnisse der neun Probanden aus Versuch A für alle Reizspektren mit Markierungen zu den berechneten Pupillendurchmessern nach Holladay, Moon & Spencer, Watson.

Die Mittelwerte bei den unterschiedlichen Reizspektren betragen  $d_{p, 450\text{nm}} = 2.04 \text{ mm}$ ,  $d_{p, 470\text{nm}} = 2.14 \text{ mm}$ ,  $d_{p, 545\text{nm}} = 3.13 \text{ mm}$  und  $d_{p, 660\text{nm}} = 3.46 \text{ mm}$ . Die Abweichungen zum Watson Modell  $\Delta d_p = |d_p - d_{p, \text{Watson}}|$  zeigen, dass der größte Fehler des Modells  $\Delta_{p, 450\text{nm}} = 0.95 \text{ mm}$  beträgt. Der niedrigste Fehler ergibt sich bei 545 nm mit  $\Delta_{p, 545\text{nm}} = 0.14 \text{ mm}$ . Aufgrund der Abweichungen kann bestätigt werden, dass die langzeitige Pupillenlichtreaktion nicht ausschließlich vom achromatischen Kanal abhängen kann, wie es beim Modell von Watson voraus-

gesetzt wird. Die erhöhte Abweichung im langwelligen Bereich entsteht durch die ipRGCs, welche aktuell nicht berücksichtigt werden im Pupillenmodell. Dies führt zu Fehlern bei der Verwendung von quasinomochromatischen Spektren.

### 4 Ergebnisse Versuch B

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob die Verwendung von polychromatischen Spektren (2300 K, 10 000 K,  $\text{ipRGC}_{\text{max}}$ ) mit konstanter Leuchtdichte zu unterschiedlichen Pupillendurchmessern führt. Dazu wird der gemittelte Pupillendurchmesser aus den letzten fünf Sekunden verwendet. Dieser wird vom Basis-Pupillendurchmesser abgezogen, um bei der Statistik die Differenz zum Ankerreiz zu betrachten. Der Mauchly-Test zeigt, dass die Annahme auf Sphärizität erfüllt ist ( $W = 0.66$ ,  $p > 0.05$ ). Das Ergebnis der Varianzanalyse mit Messwiederholung ist, dass der Pupillendurchmesser signifikante Unterschiede bei der Verwendung der polychromatischen Spektren aufweist  $F(2,22) = 522.05$ ,  $p < 0.05$ . Mit einem Eta-Quadrat von  $\eta^2 = 0.94$  ist zudem eine hohe Effektstärke zu beobachten. Ein paarweise t-Test mit Bonferroni-Korrektur zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied beim Pupillendurchmesser von 2300 auf 10 000 K mit  $p = 4.5e^{-11} < 0.05$  und 2300 K auf  $\text{ipRGC}_{\text{max}}$ -Spektrum mit  $p = 1.2e^{-10} < 0.05$  gibt. Damit muss bei der Verwendung von polychromatischen Spektren mit Farbörtern entlang des planckschen Kurvenzug auch mit Fehlern bei den Pupillenmodellen gerechnet werden. Die erfolgten Untersuchungen bestätigen die Notwendigkeit eines erweiterten Pupillenmodells, welches neben dem achromatischen Kanal auch weitere Rezeptorkanäle miteinbezieht.

### Literatur

- [1] J. N. Tinsley, M. I. Molodtsov, R. Prevedel, D. Wartmann, J. Espigulé-Pons, M. Lauwers, and A. Vaziri, "Direct detection of a single photon by humans," *Nature Communications* **7**, 12,172 EP – (2016). URL <https://doi.org/10.1038/ncomms12172>.
- [2] B. Winn, D. Whitaker, D. B. Elliott, and N. J. Phillips, "Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects." *Investigative Ophthalmology & Visual Science* **35**(3), 1132–1137 (1994).
- [3] L. L. Holladay, "The Fundamentals of Glare and Visibility," *J. Opt. Soc. Am.* **12**(4), 271–319 (1926).
- [4] A. B. Watson and J. I. Yellott, "A unified formula for light-adapted pupil size," *Journal of Vision* **12**(10), 12–12 (2012). URL <https://doi.org/10.1167/12.10.12>.