

Unterschiedswahrnehmung bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern und Bewertung des spektralen Einflusses auf die Akzeptanz in der Straßenbeleuchtung

Dipl.-Ing. Andreas Ueberschaer^{*)}, Dipl.-Ing. Andreas Walkling^{*)}

^{*)} Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau
Korrespondenzen: andreas.ueberschaer@tu-ilmenau.de, andreas.walkling@tu-ilmenau.de

1. Problem

Die Planungspraxis von Außenbeleuchtungsanlagen stützt sich auf lichttechnische Gütemerkmale, anhand derer Sehleistung, Sehkomfort und der visuelle Eindruck der Beleuchtungsszenarie beschrieben werden können. Zu den derzeitig generellen Merkmalen zählen Beleuchtungsniveau, Leuchtdichteverteilung, Lichtrichtung, Blendungsbegrenzung, Begrenzung der Lichtimmission sowie Lichtfarbe und Farbwiedergabe [01]. Die Festlegung dieser Gütemerkmale erfolgt normativ auf nationaler bzw. internationaler Ebene und beruht auf psychophysikalischen Untersuchungen, die zu einem großen Teil vor 1980 durchgeführt wurden. [02] [03]

In den gegenwärtigen Normen und Empfehlungen werden die Merkmale Lichtfarbe und Farbwiedergabe mitunter erwähnt, konkrete Nenn-, Richt- oder Grenzwerte werden hierfür allerdings nicht angegeben. [04] [05] [06] [07] [08] [09] [10] [11]

Auch die Einflüsse erschwerter Sehbedingungen auf die Wahrnehmung in Abhängigkeit des Spektrums werden in der Straßenbeleuchtung nicht berücksichtigt, obwohl das von Niederschlag reflektierte Licht die Sichtbarkeit beeinträchtigt. Die Reflexionen können zu einer Verschleierung des Sichtfeldes und somit zur Herabsetzung von Sehleistung und Sehkomfort führen [12] [13].

Zudem wird die Sehleistung des Fahrzeugführers vor allem von der Unterschiedswahrnehmung beeinflusst [14]. Beim Fahren bei Nacht ändert sich die Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld des Fahrers ständig, was zu einer laufenden Adaptationsleistung am Auge führt. Die Adaptationsleuchtdichte kann den schnellen Leuchtdichteänderungen nicht folgen. So stellt sich eine mehr oder minder zeitlich mittlere Adaptationsleuchtdichte ein, die mithilfe der mittleren Fahrbahnleuchtdichte L_m in Normen beschrieben wird [06]. Die Hintergrundleuchtdichte L_H von Sehobjekten variiert entsprechend der Ungleichmäßigkeitsverteilung der Straßenbeleuchtung,

insbesondere auf nassen Strassen, und weicht daher von der Adaptationsleuchtdichte bzw. von der mittleren Fahrbahnleuchtdichte ab. Deshalb sind die auf homogenen Feldern beruhenden Untersuchungsergebnisse und Gütekennziffern für inhomogene Leuchtdichtefelder (wie den nächtlich beleuchteten Straßen) nur begrenzt anwendbar [14][15].

2. Forschungsstand

2.1. Unterschiedswahrnehmung inhomogener Leuchtdichtefelder

Grundlegende Untersuchungen über das Verhalten der Unterschiedswahrnehmung in unbunten homogenen Feldern sind bereits Anfang des 20. Jahrhunderts durchgeführt worden. Darauf basierend hatte Berek 1942 eine analytische Funktion aufgestellt, die den Zusammenhang zwischen der Unterschiedsschwelle und den relevanten Einflussgrößen erfasst [16]. 1946 hatte Blackwell ausführliche Untersuchungen durchgeführt, die Adrian 1969 analytisch verarbeitet hatte [17] [18]. Die daraus entwickelte Funktion beschreibt die Leuchtdichte-Unterschiedsschwelle gesicherter und genauer als die Bereksche Funktion, weshalb sie noch heute beispielsweise als Basis zur Berechnung des Visibility Levels von Sehobjekten verwendet wird [15].

Erste Arbeiten zur Beschreibung der Wirkung von inhomogenen Feldern auf die Wahrnehmung kamen 1945 von Moon/Spencer [19]. Weiterführende Untersuchungen zur Unterschiedsschwelle wurden 1977 von Narisada durchgeführt, welche zeigten, dass der von einer Gesichtsfeldleuchtdichte verursachte Lichtschleier sowohl einen physiologischen als auch physikalischen Effekt hat [20]. Die Unterschiedsschwelle wird demzufolge nicht nur von der physiologisch bedingten Adaptationsleuchtdichte, sondern auch von einem physikalischen Effekt seitens der Schleierleuchtdichte beeinflusst, der die scheinbare Leuchtdichte des Sehobjekts L_O und seines Hintergrundes L_H erhöht. Die Moon-Spencer-Gleichung scheint deshalb nicht hinreichend zu sein, weil sie lediglich den physiologischen Effekt berücksichtigt.

Die Versuchsbedingungen bei Narisada orientierten sich an der Tunneleinfahrt bei Tage, wonach sich die Adaptationsleuchtdichte von der Hintergrundleuchtdichte

deutlich unterscheidet (der so genannte black-hole-Effekt). Im ersten Teilversuch wurde der Versuchsperson ein 7' min großes quadratisches Testzeichen 0,125 s in einem kreisrunden Lichtschleierfeld angeboten. Im zweiten Teil wurde der Versuch ohne Schleierfeld wiederholt. Der untersuchte Leuchtdichtebereich reichte von ungefähr $0,3 \text{ cd/m}^2$ bis 2000 cd/m^2 . Zwischen den beiden gemessenen Unterschiedsschwellen wurde ein erheblicher Unterschied festgestellt. Im Teilversuch 1 wird die Unterschiedsschwelle von der Adaptationsleuchtdichte und der Schleierleuchtdichte bestimmt. Im 2. Teilversuch wird die Unterschiedsschwelle nur von der Adaptationsleuchtdichte bzw. L_m bestimmt. Die Differenz zwischen beiden im Labor gemessenen Schwellen ergibt eine Schwelle, die allein durch die Schleierleuchtdichte verursacht wird, die unter praktischen Straßensehbedingungen der Summe aus Hintergrundleuchtdichte L_H und äquivalenter Schleierleuchtdichte L_S entspricht [21].

2.2. Bewertung des spektralen Einflusses

Nach Lachenmayr erfolgt der nächtliche Straßenverkehr überwiegend im Bereich des mesopischen Sehens [22]. Studien zeigen, dass die visuelle Leistung unter mesopischen Bedingungen vom Spektrum der Lichtquelle beeinflusst wird, wobei die Höhe dieses Einflusses abhängig ist von der jeweiligen Sehaufgabe [23].

Van Creveld verfolgte den Ansatz, dass stark gesättigte Lichtquellen heller wahrgenommen werden als weißes Licht gleicher Leuchtdichte. In diesem Zusammenhang untersuchte er u.a. den Einfluss der Lichtfarbe auf die Sichtbarkeit (Visibility). Er kam zu dem Ergebnis, dass die Lichtfarbe einen Einfluss auf die Leistung und das subjektive Empfinden (Gefallen) der Probanden hat. [24]

Bullough und Rea befassten sich mit der Fahrleistung von Probanden bei Durchführung einer simulierten Fahraufgabe mit peripheren Reizen unter mesopischen und niedrig photopischen Bedingungen bei verschiedenen Spektren. Es zeigte sich, dass der Einfluss des Spektrums höher als erwartet war und den Einfluss des Beleuchtungsniveaus überstieg. Darauf basierend schlagen sie vor, die Parameter „off-axis Sichtbarkeit“, „on-axis Sichtbarkeit“ und „Farbwiedergabe“ zukünftig für die Planungspraxis zu mit zu verwenden. [25]

In einer weiteren Studie untersuchen Bullough und Rea die Einflüsse von Regen und Schnee, die sich aufgrund der größeren Partikeldurchmesser in einem visuellen Rauschen äußern, welches sich über das Sichtfeld legt. Generell führt das durch Niederschlag reflektierte Licht zu Abschattungen der Straße oder Objekten. Hierdurch wird der Objektkontrast reduziert wodurch es zu einer Herabsetzung der Sichtbarkeit (Visibility) kommt. Bei visuellem Rauschen kommt es weiterhin zu Beeinträchtigungen im Sehfeld durch Flimmererscheinungen durch die Reflexionen an den sich bewegenden Partikeln (Regentropfen, Schneeflocken). Flimmernde Reize solch bewegter Objekte erscheinen heller als statische Objekte gleicher Leuchtdichte und können in Form von Blendung zu Unbehagen und Ermüdung führen. Unter mesopischen und niedrigen photopischen Bedingungen konnte ein Bezug zwischen S/P-Ratio und Fahrleistung hergestellt werden. [13]

Raynham kommt in seiner Studie zu dem Ergebnis, dass die Grundlagen der Straßenbeleuchtung weitere Untersuchungen benötigt, um besser auf die Bedürfnisse der Verkehrsteilnehmer eingehen zu können. Insbesondere für die Gesichtserkennung fordert er Lichtquellen mit hohen Farbwiedergabeindizes. [26]

Auch die Studie von Fotios et. al. konnte den spektralen Einfluss auf die Helligkeitswahrnehmung zeigen, wobei der Einfluss auf die Sehleistung keinen eindeutigen Zusammenhang ergab. Es wurde zwischen fovealem und extrafovealem Sehen differenziert, wobei für erstes kein und für letzteres ein Einfluss festgestellt wurde. [27]

3. Fragestellung und Theoriebezug

Basierend auf dem Forschungsstand der beiden Themengebiete „Unterschiedswahrnehmung bei inhomogenen Leuchtdichtefeldern“ und „Bewertung des spektralen Einflusses“ sollen weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden.

Zur Bestimmung der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges wird in dieser Arbeit der Einfluss des inhomogenen Gesichtsfeldes auf die Schwellenleuchtdichte bei

trockener und nasser Straßenoberfläche untersucht. Das Narisada-Experiment ist bislang nicht nachgemessen worden. Außerdem basieren die Ergebnisse auf nur einem Beobachter.

Die Akzeptanzuntersuchung konzentriert sich auf die sicherheitsrelevanten Aspekte „Objektdetektion“ und „Blendung“, die unter normalen und erschwerten Sehbedingungen empirisch erfasst und bewertet werden. Ferner soll aus den Ergebnissen ein Technologievergleich zwischen konventionellen und LED-basierten Lichtquellen abgeleitet werden.

4. Methode

Kern der Untersuchungen beider Themengebiete bildet ein Laboraufbau, für dessen Validierung eine ergänzende Feldstudie durchgeführt wird.

In Anlehnung an das Experiment von Narisada werden mit dem Laboraufbau die Ergebnisse der Schwellenleuchtdichten für inhomogene Felder verifiziert. Für die Untersuchungen des spektralen Einflusses werden die Detektions- und Blendungsuntersuchungen nach Bullough und Rea in modifizierter Form durchgeführt.

Mit dem Laboraufbau wird ein Rahmen geschaffen, um normale und erschwerte Sehbedingungen reproduzierbar zu simulieren. Für die technische Umsetzung werden Beamer verwendet, mit denen sich die Testzeichen und Schleier in wechselnden Formen darstellen lassen. Die Variation des Spektrums orientiert sich an typischen Spektralverteilungen ortsfester Straßenbeleuchtungssysteme. Um den praktischen Sichtverhältnissen auf trockener und nasser Straße näherzukommen, sind verschiedene Größen, Formen, Darbietungszeiten und Beleuchtungsniveaus für die Sehzeichen und Schleier vorgesehen.

Um eine hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, wird ein teilautomatisierter Ablauf der Versuchsreihen erstellt, wobei der Versuchsleiter eine begleitende Rolle übernimmt.

5. Ausblick

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sollen die Laborergebnisse zur Unterschiedswahrnehmung auf einer Teststraße validiert werden. Darüber hinaus sollen relevante Gütekennziffern überarbeitet werden. Hierbei sollen auch die Erkenntnisse aus den Untersuchungen unter erschwerten Sehbedingungen verstärkt Berücksichtigung finden.

6. Literatur

- [01] Carraro, U.: *Lichtanwendung in der Außenbeleuchtung* (2008)
- [02] van Bommel, W. & de Boer, J.: *Road Lighting, Macmillan, London* (1980)
- [03] CIE: *Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic*, CIE Nr. 115 (1995)
- [04] DIN 5044-1: *Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung* (1981)
- [05] DIN 13201-1 *Straßenbeleuchtung – Auswahl der Beleuchtungsklassen*, (2004)
- [06] DIN EN 13201-2: *Straßenbeleuchtung – Gütemerkmale* (2003)
- [07] CIE: *Empfehlungen für die Beleuchtung von Strassen für den Kraftfahrzeugverkehr*, CIE Nr. 12-2 (1977)
- [08] CIE: *Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic*, CIE Nr. 115 (1995)
- [09] CIE: *Guide to the lighting of urban areas*, CIE Nr. 136 (2000)
- [10] *Fundamentals of the visual task of night driving*, CIE Nr. 100, (1992)
- [11] DIN EN 12464-2: *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsplätze im Freien*, (2007)
- [12] CIE *Equations for disability glare*, CIE Nr. 146 (2002)
- [13] Bullough, J. D. & Rea, M. S.: *Driving in snow: Effect of headlamp color at mesopic and photopic light levels*, *SAE World Congress, Detroit, March 5-8* (2001)
- [14] Eckert, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Berlin, München: Verlag Technik (1993).
- [15] Adrian, W., Gibbons, R.: *Visibility level und die Sichtbarkeit in der Straßenbeleuchtung*. In: LICHT 10/1993, S. 734-739

- [16] Berek, M.: Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung von Lichtreizen. Zeitschrift f. Instrumentenkunde 63 (1943), S. 297.
- [17] Blackwell, H. R.: Contrast thresholds of the human eye. J. Opt. Soc. Am. 36 (1946), S. 624.
- [18] Adrian, W.: Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. In: Lichttechnik 21 (1969), Nr. 1, S. 2A-6A.
- [19] Moon, P., Spencer, D. E.: The visual effect of non-uniform surrounds. In: Journal Opt. Soc. Amer. 35 (1945), S. 233.
- [20] Narisada, K., Yoshimura, Y.: Adaptation luminance of driver's eyes at the entrance of tunnel... an objective measuring method. International Symposium on measures of road lighting effectiveness, Karlsruhe, Session 1, Fundamentals, 1977, S. 56-73.
- [21] Narisada, K.: Perception in complex fields under road lighting conditions. In: Lighting Res. Technol. (1995) 27(3), S. 123-131.
- [22] Lachenmayr, B. J.: Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr, *Shaker Verlag* (1995)
- [23] Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review, *Lighting Research and Technology* (2005), 37, S. 271-294
- [24] van Creveld, K.: An investigation into the relationship between luminance and brightness of strongly chromatic light sources (1999)
- [25] Bullough, J.D; Rea, M.S.: Simulated driving performance and peripheral detection at mesopic and low photopic light levels (2000)
- [26] Raynham, P.: An examination of the fundamentals of road lighting for pedestrians and drivers (2004)
- [27] Fotios, S.; Cheal, C.; Boyce, P.R.: Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review (2005)