

# ERWEITERTES *T<sub>I</sub>*-VERFAHREN FÜR EINE PRÄZISERE ERFASSUNG DER PHYSIOLOGISCHEN BLENDUNG

1. Dipl.-Ing. **Andreas Walkling**<sup>1</sup>, 2. Dr. rer. nat. habil. Werner Neundorf<sup>2</sup>, 3. Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz<sup>1</sup>, 4. Prof. Dipl.-Ing. Axel Stockmar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>) TU Ilmenau, FG Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Straße 26, 98693 Ilmenau, Deutschland

<sup>2</sup>) TU Ilmenau, FG Numerische Mathematik, Weimarer Straße 25, 98693 Ilmenau, Deutschland

<sup>3</sup>) LCI Light Consult International, Lindenallee 21a, 29227 Celle, Deutschland

## 1. Einleitung

Im Wesentlichen bestimmt die Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld die Güte einer ortsfesten Straßenbeleuchtungsanlage. Für die normative Bewertung der Güte spielen das Beleuchtungsniveau, die Beleuchtungsstärkeverteilung und die Blendung eine dominierende Rolle. Bemerkenswert ist, dass ohne Begrenzung der Blendung jegliches Bestreben nach Sehsicherheit und Sehkomfort untergraben werden kann [1].

Bei der Blendung durch Straßenleuchten unterscheidet man zwischen der physiologischen Blendwirkung und der psychologischen Blendempfindung. Die physiologische Blendung bewirkt eine Minderung der Sehfunktionen. Die psychologische Blendung führt bei längerer Einwirkung zu Unbehagen und zu vorzeitiger Ermüdung [2].

Beide Blendungsarten sind voneinander unabhängig und führen zu verschiedenen Ergebnissen. Frühere Untersuchungen deuten an, dass die physiologische Blendung schwächer als die psychologische die Straßenbeleuchtungsgüte beeinflusst [3]. Dennoch hat sich in der heutigen Beleuchtungspraxis zunehmend die Begrenzung der physiologischen Blendung durchgesetzt [4].

Grundlegende Untersuchungen über die physiologische Blendung sind bereits Anfang des 20. Jahrhunderts von Holladay zur Bestimmung der Schleierleuchtdichte durchgeführt worden [5]. Weiterführende Experimente, speziell zu Fragen der Exponenten, des Sehwinkel- und Blendwinkelbereiches und der Addierbarkeit der Wirkungen, unternahmen Fry [6], Adrian [7, 8, 9], Vos/Bouman [10], Crawford [11] und Hartmann [12, 13]. Zahlreiche Untersuchungen von Vos/Van den Berg führten 1992 zu einer modifizierten Formel für die Schleierleuchtdichte, die den Einfluss des Alters, der okularen Pigmentierung und eine Erweiterung des Blendwinkelbereiches beinhaltet [14].

Basierend auf Veröffentlichungen zur Unterschiedsschwelle von Blackwell und Adrian [15] gab Eichhoff 1970 erstmals eine mathematische Approximation für das Maß der Blendwirkung an: die prozentuale Schwellenwerterhöhung  $TI$  (Threshold Increment) [4, 16], die bis heute als Kennziffer in der Norm national und international verwendet wird. Weiterführende Untersuchungen zur Unterschiedsschwelle und Schleierleuchtdichte bei inhomogener Leuchtdichterverteilung im Gesichtsfeld erfolgten unter anderem von Narisada [17] und Moon/Spencer [18].

Die dem Verfahren zugrunde liegenden Annahmen zur Bestimmung der physiologischen Blendung entsprechen nicht mehr dem heutigen Stand der Wissenschaft. Jüngere Erkenntnisse zur Weiterentwicklung des  $TI$ -Verfahrens werden in den nächsten Kapiteln vorgestellt.

## 2. $TI$ -Verfahren nach DIN EN 13201-3

Nach Holladays Ergebnissen zur Bestimmung der Schleierleuchtdichte wurden verschiedene Blendungsmaße zur zahlenmäßigen Bewertung der Blendung vorgeschlagen. "Dabei handelt es sich um mehr oder weniger willkürliche Bewertungsmaße zum relativen Vergleich zwischen zwei verschiedenen Blendwirkungen im Sinne einer Ordinalskala." [16] Das zunächst in Deutschland verwendete Blendungsmaß von Bouma und Moon/Spencer wurde sodann von Eichhoff als prozentuale Schwellenwerterhöhung umformuliert [16]:

$$p = \left( \frac{dL_{Bl}}{dL_o} - 1 \right) * 100\% \quad (1)$$

Darin bedeuten:

$p$	Schwellenwerterhöhung in %
$dL_{Bl}$	erforderliche Unterschiedsschwelle mit Blendung in $\text{cd/m}^2$
$dL_o$	erforderliche Unterschiedsschwelle ohne Blendung in $\text{cd/m}^2$

Für den Bereich der Straßenleuchtdichten von  $0,05$  bis  $5 \text{ cd/m}^2$  wurde eine Näherungsgleichung für Gleichung (1) von Eichhoff mit einem relativen Fehler zwischen 5 und 10 % ermittelt, welche beispielsweise in DIN EN 13201-3 zur Anwendung empfohlen wird:

$$TI = TI_{uniform} = 65 * \frac{L_s}{L_m^{0,8}} \% \quad (2)$$

Darin bedeuten:

$TI$	Schwellenwerterhöhung in %
$L_s$	äquivalente Schleierleuchtdichte in $\text{cd/m}^2$
$L_m$	mittlere Fahrbahnleuchtdichte in $\text{cd/m}^2$

Zur Überprüfung dieser Beziehung wird eine eigene analytische Funktion auf Basis der Blackwell/Adrian-Daten entwickelt. Ausgangspunkt ist die Überführung einer geeigneten nicht-linearen Ausgleichsfunktion in einen linearen Ausgleich mittels Koordinatentransformation. Der anschließende Polynomausgleich liefert die Koeffizienten, die in die Ausgangskordinaten rücktransformiert werden [19, 20]. Um die Messwerte von Blackwell/Adrian am besten anzunähern, war als Ansatz eine Potenzfunktion erforderlich. Zudem wurde der relative Fehler berechnet, der hier bei 1,4 % lag. Für denselben Gültigkeitsbereich (0,05 bis 5 cd/m<sup>2</sup>) ergab sich folgende Beziehung:

$$TI_{uniform} = 62,5 * \frac{L_s}{L_m^{0,80}} \% \quad (3)$$

Abbildung 1 enthält die gemeinsame Darstellung der Schleierleuchtdichtewerte  $L_s$  beider Näherungsfunktionen als Funktion der mittleren Fahrbahnleuchtdichte  $L_m$  mit dem  $TI$ -Wert als Parameter. Der Vergleich macht deutlich, dass sich die von Eichhoff ermittelten Näherungswerte von den eigenen Werten kaum unterscheiden und folglich die heutige  $TI$ -Formel als bestätigt gelten kann. Im interessierenden Bereich der mittleren Fahrbahnleuchtdichten treten konstante Unterschiede von rund 4 % auf.

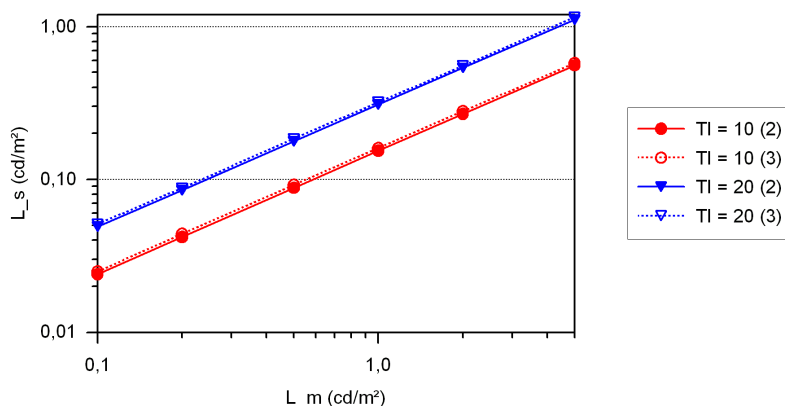


Abb. 1: Verlauf der Schleierleuchtdichte zur Erläuterung der Gültigkeit der gegenwärtigen  $TI$ -Formel. Die Kurven entsprechen den Näherungen (2) und (3).

Das  $TI$ -Verfahren nach DIN EN 13201-3 zur Ermittlung der Schwellenwerterhöhung  $TI$  enthält jedoch methodische Grenzen. Zwei wichtige sollen hier genannt sein: Zum einen wird vereinfachend die mittlere Fahrbahnleuchtdichte  $L_m$  als Adaptationsleuchtdichte des Beobachters verwendet. Diese Vereinfachung ist nicht zulässig, weil Leuchtdichteunterschiede mit einem Faktor von größer als 3 im Bewertungsfeld auftreten. Zum anderen wird zugleich vereinfachend die Blickrichtung des Beobachters parallel zur Längsachse, mit einem Neigungswinkel von 1° nach unten konstant gehalten. Eine praxisnahe variable Blickrichtung innerhalb des Bewertungsfel-

des wird nicht berücksichtigt. In Anbetracht dieser Zusammenhänge erscheint eine Weiterentwicklung des gegenwärtigen *TI*-Verfahrens geboten.

### 3. Erweitertes *TI*-Verfahren

Das heutige Verfahren geht vereinfachend von einer homogenen Leuchtdichteverteilung im Bewertungsfeld aus. Um den Verhältnissen der Straßenbeleuchtung bei trockener oder gar nasser Fahrbahn näherzukommen, sollte aber die inhomogene Leuchtdichteverteilung im Bewertungsfeld einberechnet werden. Zur Lösung dieser Aufgabenstellung stützen sich die Autoren auf Arbeiten von Narisada [17, 21], welcher von der Summierbarkeit der Unterschiedsschwellen  $dL_{min}$  bezüglich der mittleren Fahrbahnleuchtdichte  $L_m$ , der Hintergrundleuchtdichte  $L_h$  und der Schleierleuchtdichte  $L_s$  ausgeht. Die Hintergrundleuchtdichte ist dabei die unmittelbare Umfeldleuchtdichte auf der Fahrbahn, in der jeweiligen Blickrichtung. In Abbildung 2 findet man die Teileinflüsse auf die Gesamtunterschiedsschwelle nach Narisada wiedergegeben.

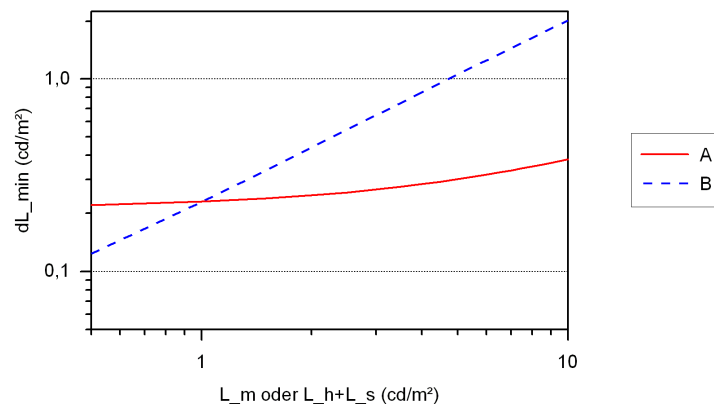


Abb. 2: Zusammenhang zwischen der Unterschiedsschwelle  $dL_{min}$  und der mittleren Fahrbahnleuchtdichte  $L_m$  (Kurve A) und der Summe aus Hintergrundleuchtdichte  $L_h$  und Schleierleuchtdichte  $L_s$  (Kurve B).

Zur Aufstellung des erweiterten funktionalen Zusammenhangs  $TI_{non-uniform} = f(L_m, L_h, L_s)$  wird eine eigene analytische Funktion auf Basis der experimentellen Daten von Narisada entwickelt. Ausgangspunkt ist die Überführung einer geeigneten nicht-linearen Ausgleichsfunktion in einen linearen Ausgleich mittels Koordinatentransformation. Der anschließende Polynomausgleich liefert die Koeffizienten, die in die Ausgangskordinaten rücktransformiert werden [19, 20]. Um die Messwerte von Narisada am besten anzunähern, war als Ansatz ebenso eine Potenzfunktion erforderlich. Dazu wurde der relative Fehler berechnet, der hier bei 9% liegt, was für die Praxis ausreichend genau sein dürfte. Für den erweiterten Gültigkeitsbereich von 0,05 bis 20  $cd/m^2$  ergab sich folgende Beziehung:

$$TI = TI_{non-uniform} = 36 * \frac{L_s}{L_m^{0,05} * L_h^{0,66}} \% \quad (4)$$

Darin bedeuten:

$TI$	Schwellenwerterhöhung in Prozent
$L_s$	äquivalente Schleierleuchtdichte in $\text{cd/m}^2$
$L_m$	mittlere Fahrbahnleuchtdichte in $\text{cd/m}^2$
$L_h$	Hintergrundleuchtdichte in $\text{cd/m}^2$

Man beachte jedoch dabei, dass sich die Messergebnisse von Narisada auf Versuchsbedingungen stützen, die aus heutiger Sicht als statistisch nicht hinreichend gesichert erscheinen. Deshalb dient diese analytische Verarbeitung als eine erste Abschätzung hinsichtlich der erforderlichen Koeffizienten. Derzeitig laufen vergleichbare Untersuchungen zur Unterschiedschwelle an der TU Ilmenau, um die Ergebnisse von Narisada nachzuvollziehen, die Koeffizienten zu überprüfen und gegebenenfalls zu modifizieren.

Ausgehend von den Gleichungen (2) und (4) soll anhand eines Standardbeleuchtungsbeispiels (Lichtpunktabstand = 32 m, Lichtpunkthöhe = 8 m, Fahrbahnbreite = 7 m, einseitige Anordnung, Beleuchtungsklasse ME3a mit der Anforderung  $TI \leq 15\%$ , Standardfahrbahnoberflächen C2 und W4) die veränderte Bewertung der physiologischen Blendung in der Praxis vorgestellt werden. Für die Berechnung mit Gleichung (2) wird die herkömmliche nach DIN definierte Beobachtungsgeometrie mit konstant gehaltener Blickrichtung längs der Straße benutzt. Hingegen verwendet die Berechnung mit Gleichung (4) eine Beobachtung mit variabler Blickrichtung. Variabel heißt hierbei, dass der Beobachter auf jeden Rasterpunkt im DIN-Rasterfeld blickt und unter der Annahme, dass die Hintergrundleuchtdichte  $L_h$  der vorliegenden Leuchtdichte im Rasterpunkt entspricht, der  $TI$ -Wert berechnet wird. Wie bei der herkömmlichen Berechnung wird der auftretende Maximalwert für jeden Beobachterstandort für die weitere Auswertung zugrunde gelegt.

Abbildung 3 stellt die Ergebnisse für die C2-Straße (trockene Fahrbahn) basierend auf den Gleichungen (2) und (4) dar. Aus dem Kurvenverlauf ist zu erkennen, dass der maximal auftretende  $TI$ -Wert von 15,9% an Position 1 nach herkömmlicher Gleichung (2) größer ausfällt. Damit wäre diese Beleuchtungsanlage nicht normgerecht ausgelegt. Nach erweiterter  $TI$ -Gleichung (4) ergibt sich hingegen ein  $TI$ -Wert von 14,4%. Dies bedeutet, dass diese Anlage sehr wohl normgerecht dimensioniert wäre.

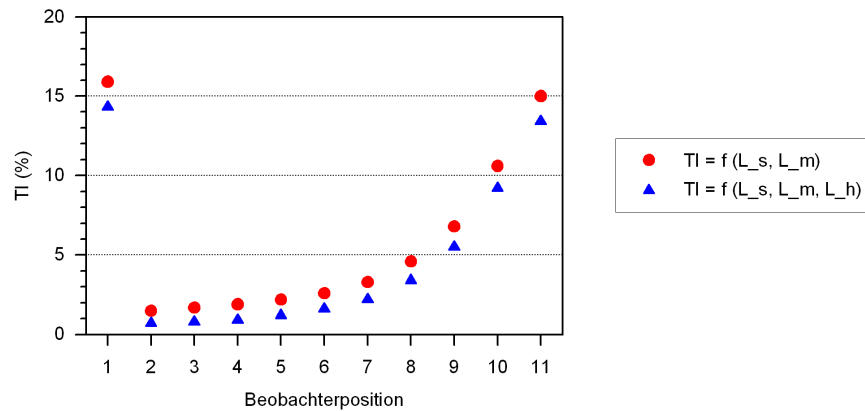


Abb. 3: Vergleich zwischen den Schwellenwerterhöhungskurven  $TI_{uniform}$  und  $TI_{non-uniform}$  nach Gleichungen (2) und (4) bei trockener Fahrbahn C2 an den bewegten DIN-Standorten des Beobachters.

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der  $TI$ -Werte für die W4-Straße (nasse Fahrbahn) basierend auf den Gleichungen (2) und (4). Betrachtet man die Ergebnisse, so kann man erkennen, dass hierbei die Abweichungen zwischen der herkömmlichen und erweiterter  $TI$ -Näherungsformel größer ausfallen. Der relevante  $TI$ -Maximalwert nach Gleichung (2) beträgt lediglich 7,7 %, wogegen er nach erweiterter  $TI$ -Gleichung tatsächlich 25,7 % groß ist.

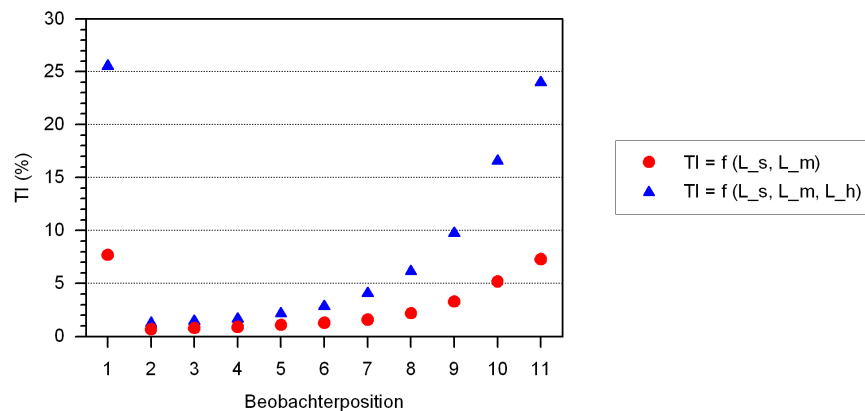


Abb. 4: Vergleich zwischen den Schwellenwerterhöhungskurven  $TI_{uniform}$  und  $TI_{non-uniform}$  nach Gleichungen (2) und (4) bei nasser Fahrbahn W4 an den bewegten DIN-Positionen des Beobachters.

Zusammenfassend lässt sich feststellen: Der Vergleich zwischen den Schwellenwerterhöhungen nach herkömmlicher und erweiterter  $TI$ -Formel ergibt deutliche Abweichungen. Beachtenswert erscheint, dass die Höhe der Abweichung von der Leuchtdichteverteilung im Bewertungsfeld abhängt. Je größer die Leuchtdichteunterschiede zwischen  $L_{min}$ ,  $L_{max}$  und  $L_m$  vorkommen, desto ausgeprägter sind die Unterschiede bei der  $TI$ -Berechnung, wobei der erweiterter  $TI$ -Wert kleiner oder größer als der herkömmliche sein kann. Bei weniger inhomogenen Verteilungen kann man von einer Abweichung größer gleich 10 % ausgehen (siehe Abbildung 3). Inhomoge-

neren Verteilungen dahingegen können eine Abweichung größer gleich 200 % zwischen beiden Ansätzen verursachen (siehe Abbildung 4).

#### 4. Fazit

Die vorigen Kapitel zeigen, dass die physiologische Blendung  $TI$  nach erweitertem Verfahren eine praxisgerechtere Bewertung ermöglicht. Der neue Ansatz eignet sich deshalb für eine präzisere quantitative Erfassung der Blendwirkung in der Straßenbeleuchtung. Aufgrund der deutlichen Veränderung zum  $TI_{uniform}$ -Ergebnis nach der bisherigen Methode wird der erweiterte Ansatz  $TI_{non-uniform}$  zur Anwendung in der Beleuchtungspraxis empfohlen. Die dazugehörigen Exponenten können jedoch erst nach der oben genannten Schwellenuntersuchung zuverlässig festgelegt werden.

#### 5. Literatur

[1] Lindner, H., Knoche, H.: Anpassungsleistungen des optischen Analysators. Lehrbrief der TH Ilmenau, 1976

[2] LiTG-Schrift 10: Methoden zur Bewertung der Blendung in der Straßenbeleuchtung, 1981

[3] Adrian, W., Eberbach, K.: Zur Frage der psychologischen Blendung in der Straßenbeleuchtung. In: Lichttechnik 17 (1965), Nr. 11, S. 137 A

[4] CIE Publikation 115-2010: Lighting of roads for motor and pedestrian traffic

[5] Holladay, L.: The fundamentals of glare and visibility. In: Journ. Opt. Soc. Am. 12 (1926), S. 271

[6] Fry, G. A.: Physiological basis of disability glare. In: Proceedings, CIE Zürich 1955, Vol. I 1.42 U-F/4 S. 2

[7] Adrian, W.: Der Einfluss störender Lichter auf die extrafoveale Wahrnehmung des menschlichen Auges. In: Lichttechnik 13 (1961), Nr. 9, S. 450

[8] Adrian, W.: Der Einfluss störender Lichter auf die extrafoveale Wahrnehmung des menschlichen Auges. In: Lichttechnik 13 (1961), Nr. 11, S. 508 u. S. 558

[9] Adrian, W.: Zur Blendungsbewertung bei der Beleuchtung von Straßen. In: Lichttechnik 16 (1964), Nr. 11, S. 541

- [10] Vos, J. J., Bouman, M. A.: Disability glare: theory and practice. In: Proceedings CIE Bruxelles 1959 vol. B, Publications CIE No. 5 (1960), S. 298
- [11] Crawford, B. M.: The integrations of the effects from a number of glare sources. In: Proceedings Phys. Soc. London 48 (1936), S. 35
- [12] Hartmann, E.: Die Schwelle der physiologischen Blendung. In: Lichttechnik 15 (1963), Nr. 10, S. 503
- [13] Hartmann, E., Ucke, Ch.: Der Einfluss der Blendquellengröße auf die physiologische Blendung bei kleinen Blendwinkeln. In: Lichttechnik 20 (1974), Nr. 1, S. 20
- [14] Vos, J. J., Van den Berg T. J.: On the course of the disability glare function and its attribution to components of ocular scatter. In: CIE collection on colour and vision (1999) 124/2, S. 11
- [13] Adrian, W.: Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung. In: Lichttechnik 21 (1969), Nr. 1, S. 2 A
- [15] Eichhoff, L.: Möglichkeiten zur quantitativen Erfassung der physiologischen Blendung. In: Lichttechnik 22 (1970), Nr. 4, S. 185
- [16] 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
- [17] Moon, P., Spencer, D. E.: The visual effect of non-uniform surrounds. In: Journal Opt. Soc. Amer. 35 (1945), S. 233
- [18] Neundorf, W.: Numerische Mathematik. Vorlesungen, Übungen, Algorithmen und Programme, Shaker Verlag GmbH Aachen, Dez. 2002
- [19] Neundorf, W.: Matlab - Teil IV. Approximation, Numerische Integration. Preprint No. M 11/00, Mai 2000
- [20] Narisada, K.: Perception in complex fields under road lighting conditions. In: Lighting Res. Technol. (1995) 27(3), S. 123