

# Erfassung von Blendungskennzahlen mit bildauflösender Leuchtdichtemesstechnik

## 1 Einleitung

Das menschliche Auge ist ein sehr komplexer Sehapparat mit einer Vielzahl von verschiedenen und sehr unterschiedlich angeordneten Sehzellen in Kombination mit einer komplexen Motorik. Die Informationserfassung in der Hauptblickrichtung kann durch relativ helle Lichtquellen im In- und Umfeld gestört werden.

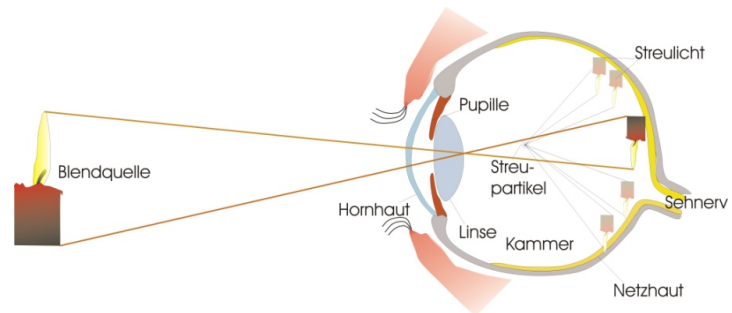


Bild 1: Schnitt durch das menschliche Auge

Die zu hohen Leuchtdichten führen in den Sehzellen zu einer chemischen Überreaktion. Dies beeinträchtigt die Sehfähigkeit (Lokaladaptation, relative Blendung zum Beispiel). Die gleichzeitig auftretenden Streueffekte im Auge an Partikeln in der Linse, in der Vorkammer und im Glaskörper erzeugen ein Streulicht, das sich auf der Netzhaut überlagert. Dadurch werden die Kontraste der abgebildeten Bilder im fovealen wie extrafovealen Sehfeldbereich vermindert (Kontrastminderung). Eine weitere Art der störenden Einwirkung tritt auf, wenn ein unangenehmes Gefühl des geblendet Seins durch zu hohe Leuchtdichten verursacht wird. Diese Effekte werden unter dem Sammelbegriff physiologische und psychologische Blendung zusammengefasst. Um Blendung quantitativ bewerten zu können, versucht man die Eigenschaften des Auges in geeigneter Weise mit Formeln zu beschreiben [2, 3, 4]. Dabei werden auch unterschiedliche Sehaufgaben und ihre Anforderungen berücksichtigt. So wird Blendung beispielsweise im nächtlichen Straßenverkehr anders behandelt als Blendung an Bildschirmarbeitsplätzen oder Lichtimmissionen durch nächtliche Sportstättenbeleuchtung. Festlegungen zu Kennzahlen und ihren zulässigen Grenzwerten sowie Messvorschriften sind in Richtlinien und Gesetzen [1, 11] festgehalten und geregelt.

## 2 Blendungsbewertung

Zur Beurteilung der Blendung von Beleuchtungsanlagen, werden je nach Sehaufgabe und Anwendung unterschiedliche Kennzahlen herangezogen:

- Max. tolerierbare mittlere Leuchtdichte der Blendquelle (nach LAI)
- Vertikale Beleuchtungsstärke am Fenster
- äquivalente Schleierleuchtdichte angewendet in der Schwellwerterhöhung TI (Threshold Increment)
- Unified Glare Rating (UGR)
- Daylight Glare Probability (DGP)

Alle diese Messvorschriften verknüpfen die Leuchtdichten  $L(\varphi, \vartheta)$  von leuchtenden Objekten mit Ihrer Einstrahlungsrichtung  $(\varphi, \vartheta)$ , ihrer Größe im Gesichtsfeld - dem Raumwinkel  $\Omega$  und den Umfeld- bzw. Adaptationsleuchtdichten.

$$\text{Blendgröße} X = f_{Bl} \left( L_{\text{Blendquelle}}(\varphi, \vartheta); \Omega; \varphi; \vartheta; L_{\text{Umfeld}} \right) \quad (1)$$

In der gängigen Praxis werden zur Bestimmung der Blendungskennzahlen aufwändig die Leuchtdichten der Blendquellen mit Leuchtdichtemessern gemessen und ihre Positionen mit

einem Winkelmesser (z.B. Theodolit) erfasst. Durch den Einsatz von Leuchtdichtemesskameras kann dieser Messprozess ganz wesentlich vereinfacht werden / 6 // 7 // 8 // 9 // 10 /.

### 3 Stand der Normung

Die neue Publikation Nr. 12.3 von 2011 der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft e.V. (LiTG) konkretisiert die im Bundes-Immissionsschutzgesetz beschriebenen Lichteinwirkungen auf die Umwelt /11/. Belästigende Lichteinwirkungen nach dieser Stellungnahme sind im Bereich der Blendung zum einen die psychologische Blendung beim Blick ins Freie, zum anderen die Verschlechterung der Sehleistung von Fahrzeugführern (physiologische Blendung). Zum ersten Mal werden Hinweise zur messtechnischen Bestimmung der Blendkennzahlen und deren blendrelevanten Parametern mithilfe von bildauflösenden Leuchtdichtemesskameras als eine praxistaugliche Messeinrichtung aufgenommen.

Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) hat den Technischen Bericht 194 über „Systeme zur Vorortmessung der photometrischen Eigenschaften von Straßen- und Tunnelbeleuchtung“ 2011 herausgegeben /12/. Dieser beschreibt und definiert die technischen Grenzen und Eigenschaften erstmals auch von digitalen Messsystemen (inkl. Messbedingungen und –methodiken), um deren Vor- und Nachteile und Messergebnisse bei der Messung von Leuchtdichten auf Straßenoberflächen abschätzen zu können, die als ein Parameter bei der Bestimmung der TI-Kennziffer eingehen.

Die EN 13201-4 (Straßenbeleuchtung) wurde von einer gemeinsamen Arbeitsgruppe des CEN/TC169 und CEN/TC226 erarbeitet, wobei für die deutsche Mitarbeit der FNL 11 „Außenbeleuchtung“ im Normenausschuss Lichttechnik im DIN verantwortlich war /13/. Im Jahre 2004 erhielt sie den Status einer nationalen Norm. Der Teil 4 behandelt Methoden zur Messung der Güteermkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen. Für die Messung der Leuchtdichte der Straßenoberfläche wird lediglich die Anwendung und Auswahl von konventionellen Leuchtdichtemessgeräten mit bestimmten Öffnungswinkeln oder einer trapezförmigen Blende empfohlen. Empfehlungen zur Anwendung von bildauflösenden Leuchtdichtemesskameras sind nicht enthalten. In diese Richtung könnte der Teil 4 bei der gegenwärtig laufenden Überarbeitung der EN 13201 erweitert werden, zumal auch die Messung der äquivalenten Schleierleuchtdichte und damit die Bestimmung der TI-Kennziffer mit bildauflösenden Leuchtdichtemesssystemen heute schon praxistauglich durchführbar ist.

### 4 Erfassung der Leuchtdichtebilder

Bildauflösende Leuchtdichtemesskameras erfassen alle erforderlichen photometrischen und geometrischen Daten mit einer Bildaufnahme / 5 /.

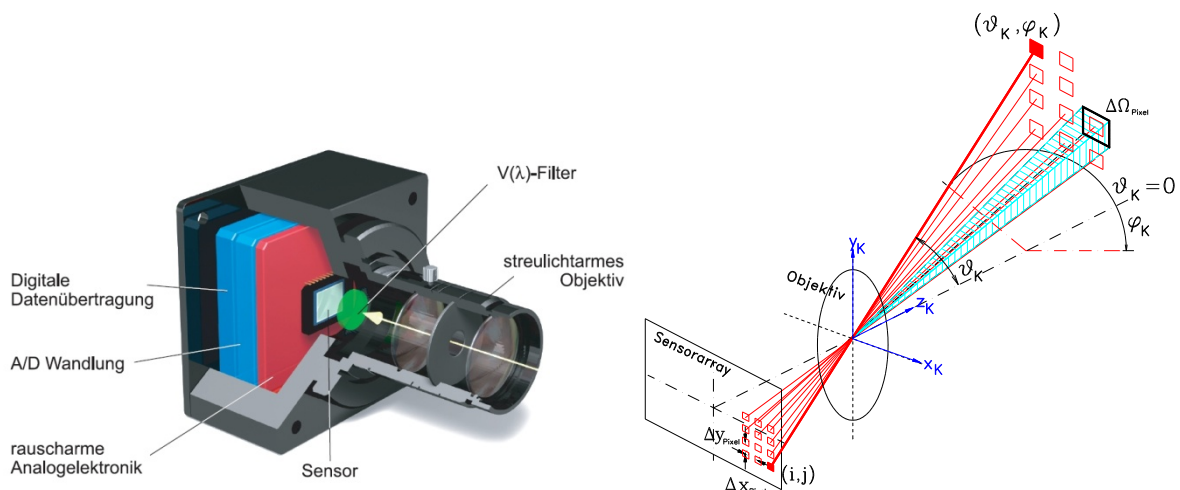


Bild 2: Leuchtdichtemesskamera LMK98-4

Bild 3: Zusammenhänge der geometrischen Abbildung

Die Standardsysteme arbeiten heute mit Auflösungen von ca. 1,5 Megapixel, (ca. 1400 x 1100) bis zu 16 Megapixel (ca. 4096 x 4096). Mit dem Einsatz unterschiedlicher Objektive (Weitwinkel- oder Teleobjektiv) erreicht man für alle Aufgaben eine ausreichend hohe Winkelauflösung  $\Delta\varphi, \Delta\vartheta$ . Ein Halbraumobjektiv (Fischauge) kann zum Beispiel den kompletten Halbraum ( $2\pi$ ) mit nur einer Leuchtdichtebildaufnahme erfassen.

In einem Leuchtdichtebild steht für jeden Bildpunkt  $(i, j)$  ein Leuchtdichtewert und eine Richtung aus der die Leuchtdichte gesehen wird  $L(\vartheta, \varphi)$  zur Verfügung. Zusätzlich repräsentiert jedes Pixel auch einen Raumwinkel  $\Delta\Omega(i, j)$ , ausgerechnet aus den bekannten Winkelabständen zu den benachbarten Bildpunkten.

Für die meisten Objektive sind die tatsächlichen Bildfeldwinkelverhältnisse aufgrund einer optischen Verzeichnung etwas komplexer. Diese Zusammenhänge können aber gemessen und in Form von Softwaredatensätzen für  $\vartheta = f_\vartheta(i, j)$ ,  $\varphi = f_\varphi(i, j)$  und  $\Delta\Omega = f_\Omega(i, j)$ , in Form eines Korrekturbildes oder Koordinatensystems abgelegt und für die Bestimmung geometrischer Messdaten (Blickwinkel, Raumwinkel) verwendet werden. Leuchtdichtemesskameras liefern somit in einem Messbild für jedes Pixel  $(i, j)$  einen Messwert  $L(\vartheta, \varphi)$  und den dazugehörigen Raumwinkel  $\Delta\Omega$ . Die zu bewertenden Leuchtdichten haben in der Regel eine sehr hohe Dynamik. Die Leuchtdichten der Blendquellen können durchaus im Bereich von  $\gg 10^4$  bis  $\gg 10^6$  cd/m<sup>2</sup> liegen (bspw. Bei direkter Sicht in das Leuchtmittel). Die Umfeldleuchtdichten können in wenig bebautem Gebiet im Bereich von  $10^{-3}$  cd/m<sup>2</sup> liegen.

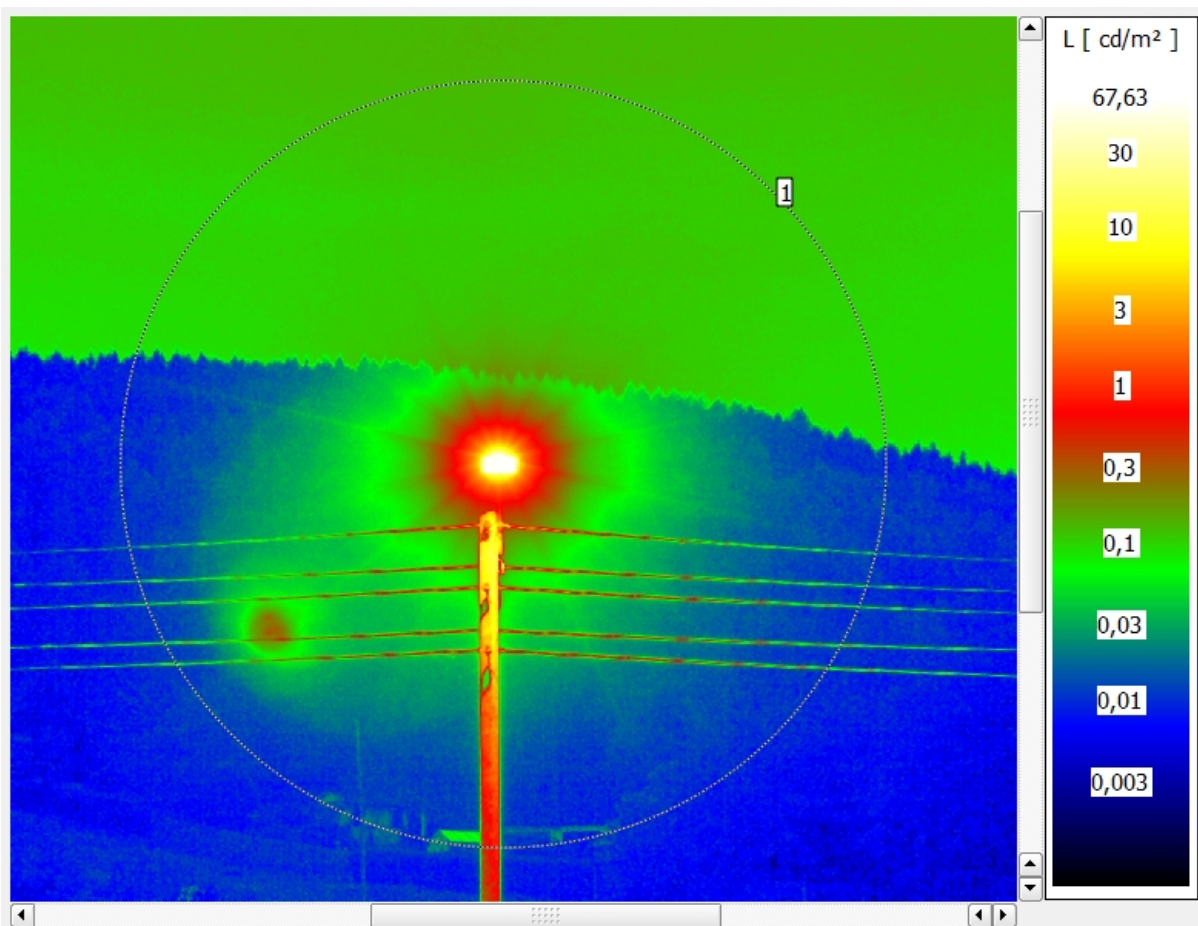
Verfügbare Leuchtdichtemesskameras können durch die Integrationszeitsteuerung und den Einsatz von Graufiltern diesen Dynamikumfang abdecken. Für die Korrektur von Streulicht stehen Algorithmen zur Verfügung.

## 5 Ableitung von Blendungskennzahlen aus Leuchtdichteaufnahmen

Die Leuchtdichten in den Bildern können je nach Aufgabenstellung klassifiziert werden – **geometrisch** – (bspw. zu einem Umfeld von 20° gehörend oder die mittlere Leuchtdichte der Fahrbahn eines abgegrenzten Straßenabschnitts) oder – **photometrisch** – (bspw. größer als eine Schwellenleuchtdichte oder größer als ein Mittelwert im Umfeld). Das Resultat der Pixelklassifizierung sind Bildbereiche bzw. geometrische Regionen, deren Pixel unterschiedliche Bedeutung haben (Anteil der Blendquelle, des Umfeldes, des passiven Bereichs u.v.m.). Damit stehen alle Informationen zur Berechnung einer Blendungskennzahl zur Verfügung. Je nach Art der Blendung bzw. Sehaufgabe können unterschiedliche formale Zusammenhänge zur Berechnung der Blendungskennzahl in der Bildauswertungssoftware bereitgestellt werden.

Als Beispiel für die Messung mit einer Leuchtdichtemesskamera soll die Lichtimmission verursacht durch eine Straßenleuchte beurteilt werden, auch wenn derzeit Anlagen zur Beleuchtung des öffentlichen Straßenraumes nicht zu den Anlagen im Sinne des §3 Abs. 5 BimSchG gehören.

In der ersten Aufnahme wird einem großen Bildfeld (kurze Brennweite) das Umfeld erfasst. Dabei wird die Belichtungszeit so eingestellt, dass die dunklen Bildbereiche des Umfeldes ( $< 0,01$  cd/m<sup>2</sup>) noch sicher gemessen werden können. Eine massive Übersteuerung der Bildanteile der Blendquelle wird dabei in Kauf genommen. In diesem Bild kann bspw. aus einer 20° Kreisregion in der Umgebung um die Lichtquelle mit einem Leuchtdichteschwellwertobjekt die mittlere Leuchtdichte ohne Blendquelle bestimmt werden.



**Bild 4: Leuchtdichtebild mit Region 20° Umfeld (5-fach logarithmisch)**

In einer zweiten Aufnahme, aufgenommen mit einem kleinen Bildfeld (lange Brennweite) und einem Graufilter, wird übersteuerungsfrei die Leuchtdichte der Blendquelle gemessen.

Dabei ist zu beachten, dass die Belichtungszeiten lang genug sind, um Messfehler aufgrund des Lichtflimmerns der Lampen (Netzfrequenz, Modulation des Vorschaltgerätes o. ä.) zu vermeiden (50 Hz-Wechselstrom = 100 Hz Lichtflimmern, d.h.  $T_i \gg 10$  ms).

| <b>Bild</b> | <b>Klasse</b> | <b>Fläche/<math>\Omega_0</math></b> | <b>Mittelwert/<math>cd/m^2</math></b> | <b>E/lx</b> | <b><math>Ls^2 \cdot \Omega</math></b> |
|-------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| Blendquelle | Hell          | 7,6E-05                             | 4700                                  | 0,36        | 1700                                  |
| Umfeld      | Dunkel        | 0,094                               | 0,083                                 |             |                                       |

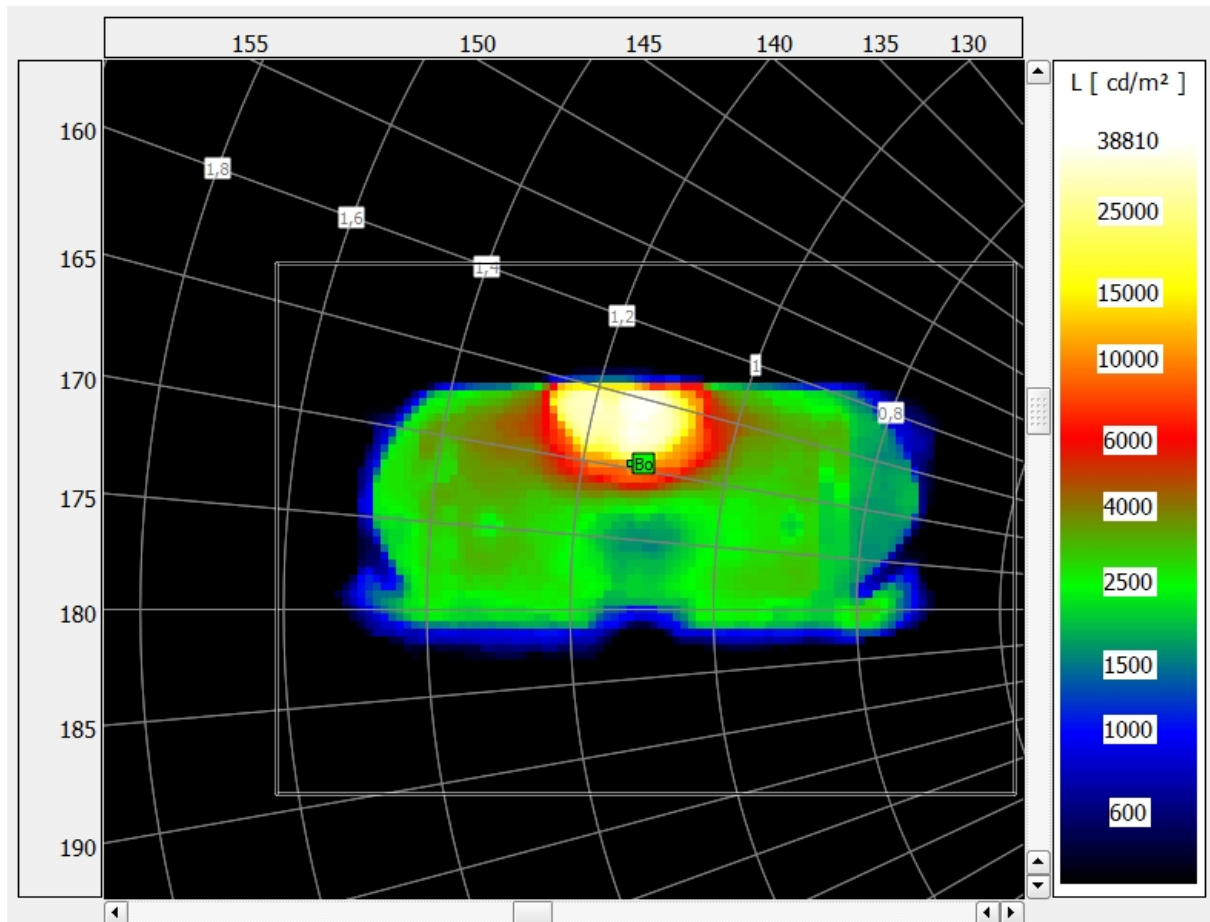
**Tabelle 1: Schwellwertstatistiktable zur Berechnung der vertikalen Beleuchtungsstärke und der maximal tolerablen Leuchtdichte der Blendquelle in der Auswertungssoftware**

Die vertikale Beleuchtungsstärke  $E_{vert}$ , als abgeleitete Messgröße der Blendlichtquelle, errechnet sich bei horizontaler Ausrichtung der Leuchtdichtemesskamera aus der Leuchtdichte und dem Raumwinkel der Lichtquelle, verknüpft mit dem Lichteinfallswinkel. Nach dem photometrischen Grundgesetz gilt:

$$E_{vert} = \sum_{i,j} L(i,j) \cdot \Delta\Omega(i,j) \cdot \cos \vartheta \quad \text{für } \forall(i,j) \ni \text{Lichtquelle} \quad (2)$$

Das bedeutet jeder, einer Blendquelle zugeordnete Leuchtdichtewert, muss mit einem ortsabhängigen Faktor multipliziert werden und die Produkte sind zu addieren. Diese Faktoren können in einem entsprechenden Bild oder in einem Koordinatensystem zusammengefasst abgelegt werden (siehe Abschnitt 4). Das vereinfacht diese Multiplikation in nur einer Bildverar-

beutungsoperation. Die Zuordnung der Pixel zur Blendquelle erfolgt mit einem Schwellwertstatistikobjekt, d. h. der Vorgabe eines Leuchtdichteschwellwertes, in der Auswertungssoftware.



**Bild 5: Leuchtdichtebild der Blendquelle mit Winkelkoordinatensystem**

In dem konkreten Beispiel wird aus der gemessenen Leuchtenleuchtdichte und den zugehörigen Raumwinkelanteilen eine vertikale Beleuchtungsstärke  $E_{vert}$  von 0,36 lx, an der Aufnahmeposition mit der Software, ausgerechnet. Die vertikale Beleuchtungsstärke  $E_{vert}$ , wird dabei ausschließlich durch die Blendlichtquelle erzeugt.

Zudem errechnet sich aus den Messgrößen auch das Blendmaß  $k_S$  mit:

$$k_S = \sqrt{\frac{\bar{L}_S \cdot \Omega_S}{L_u}} = 133$$

Unter Berücksichtigung von  $L_{u,min} = 0,1$  wird daraus  $k_S = 129$ .

## 6 Literatur

- / 1 / Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen; Beschluss des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) vom 10. Mai 2000
- / 2 / Schreuder, D. A.; Straßenbeleuchtung für Sicherheit und Verkehr; Shaker Verlag Aachen 2001
- / 3 / Hentschel, H.-J.: Licht und Beleuchtung, Theorie und Praxis der Lichttechnik; Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 5. Auflage 2002

- / 4 / Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations; Publication CIE 150:2003; ISBN 3 901 906 19 3
- / 5 / Krüger, U. „Ausgewählte Aspekte der orts aufgelösten Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen“ Dissertation TU Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2004
- / 6 / Wolf, S.: Entwicklung und Aufbau eines Leuchtdichte-Analysators zur Messung von Blendungskennzahlen Dissertation, Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik der TU Ilmenau Nr. 7, Der Andere Verlag Osnabrück 2004, ISBN 3-89959-280-8
- / 7 / Schmidt, F.; Krüger, U.; Porsch, T.; Erfassung von Blendwerten mittels bildauflösender Leuchtdichtemesstechnik, LICHT 2006, Bern 10.-13.09.2006, Tagungsband 8 S
- / 8 / Porsch, T.; Schmidt, F.: Blendungsbewertung mit bildauflösender Lichtmesstechnik in Theorie und Praxis, Lux-Junior 2007, Ilmenau
- / 9 / Nechwatal, J. ; Messtechnische Erfassung der lichttechnischen Bewertungsgröße UGR in realen Beleuchtungslösungen unter Feldbedingungen basierend auf der LMK-Mobile-Technologie; Dipl.-Arbeit, TU-Ilmenau, Fak. Maschinenbau 2008
- / 10 / Nechwatal, J. ; Porsch, T. : Messtechnische Erfassung der lichttechnischen Bewertungsgröße UGR in realen Beleuchtungslösungen unter Feldbedingungen basierend auf der LMK-Mobile-Technologie; LICHT 2008, Ilmenau 10.-13-09.2008, Tagungsband S144-149
- / 11 / Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen LiTG-Publ. 12.3 (2011) (ISBN 978-3-927787-35-3)
- / 12 / CIE194: On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting, 2011
- / 13 / DIN EN 13201-2 Straßenbeleuchtung – Teil 4: Methoden zur Messung der Gütemerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen, 2004