

# Einsatz von bildgebenden Leuchtdichtemesskameras bei der Bewertung von Blendungssituationen

Tobias Porsch; Udo Krüger; Franz Schmidt  
TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, W.-v.-Siemens-Str. 5, 98693 Ilmenau  
eMail: [tobias.porsch@technoteam.de](mailto:tobias.porsch@technoteam.de)

## 1 Einleitung

Über die Möglichkeiten der Bestimmung von Blendungskennzahlen mit Hilfe von bildauflösenden Leuchtdichtemesskameras (LMK) wurde schon mehrfach berichtet / 7// 10// 11// 12// 13/.

Inzwischen sind LMK's weltweit Stand der Technik und werden von mehreren Herstellern in unterschiedlichen Konfigurationen angeboten. Aktuell auf dem Markt angebotene LMK's besitzen ähnliche Eigenschaften, wie punktweise messende Leuchtdichtemesser der Klasse B, nach DIN 5032 Teil 7.

Bei der Überarbeitung der LiTG Schrift 12.3 / 14/ im vorigen Jahr und bei der derzeitigen Überarbeitung der LAI / 1/ wurden Hinweise zur Nutzung von LMK's aufgenommen. Deshalb und auf Grund der in den letzten Jahren erfolgten Verbesserung der technischen Parameter von LMK's sollen hiermit erneut deren Einsatzmöglichkeiten zur Bestimmung von Blendungskennzahlen vorgestellt werden.

## 2 Blendungsbewertung

Zur Beurteilung der Blendwirkung von Beleuchtungssystemen, werden je nach Beleuchtungsaufgabe und technischer Umsetzung unterschiedliche Blendungskennzahlen und Messmethoden angewandt:

- Max. tolerierbare Leuchtdichten der Blendquelle (nach LAI)
- Vertikale Beleuchtungsstärke am Fenster zur Beurteilung der Raumaufhellung
- Äquivalente Schleierleuchtdichte
- Schwellwerterhöhung TI (Threshold Index)
- Unified Glare Rating (UGR)
- Daylight Glare Probability (DGP)
- u. v. m.

Sämtliche Messvorschriften erfassen Leuchtdichten  $L(\varphi, \vartheta)$  im Sichtfeld, klassifizieren diese als leuchtendes (blendendes) Objekt und verknüpfen diese mit Ihrem Blickwinkel  $(\varphi, \vartheta)$  im Messszenario sowie Ihrer flächigen Größe, dem Raumwinkel  $\Omega$  und den Leuchtdichten im Umfeld  $L_{Umfeld}(\varphi, \vartheta)$  / 2/ / 3// 4/.

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

$L_{Blendquelle}$	= Leuchtdichte der Blendquelle
$L_{Umfeld}$	= Leuchtdichte des Umfeldes (mittlere Leuchtdichten oder geeignet gewichtete Leuchtdichten in einem definierten Umfeld)
$\Omega_{Blendquelle}$	= Raumwinkel unter dem die Blendquelle erscheint
$\vartheta, \varphi$	= Winkel unter dem die Blendquelle erscheint ( $\vartheta=0$ entspricht i.d.R. der Blickrichtung)

Zur Bestimmung von Blendungskennzahlen werden heute noch vielfach die Leuchtdichten der Blendquellen mit Leuchtdichtemessern punktweise gemessen und ihre

Positionen mit einem Winkelmesser (z.B. Theodolit) erfasst. Zur Ermittlung der Größe der Blendquellen (Raumwinkel) sind verschiedene durchaus komplizierte Verfahren vorgesehen (Winkelmessung der Grenzen der Blendquelle mittels Theodoliten). Auf Grund dieser aufwendigen Verfahren werden Blendungskennzahlen meist nicht nachgemessen, sondern oft aus den photometrischen Angaben der Leuchtenhersteller, beispielsweise der Lichtverteilungskurve (LVK) der verwendeten Leuchte und der Raumgeometrie berechnet.

Mit bildauflösenden Leuchtdichtemesssystemen (LMK, Videophotometer / 5// 6 // 8// 9/) können die zur Berechnung von Blendungskennzahlen notwendigen Messdaten mit einer oder wenigen Aufnahmen schnell und unkompliziert gemessen werden. Entsprechende Softwarelösungen zur Errechnung verschiedenster Blendungskennzahlen aus diesen Messdaten stehen ebenfalls zur Verfügung.

### 3 Eigenschaften von LMK's

LMK's sind Digitalkameras, die mit spektral angepassten Filtern im Strahlengang eine Empfindlichkeit entsprechend der Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges  $V(\lambda)$  nachempfinden. Eine reale Messkamera besitzt Eigenschaften, die von einem idealen Messgerät mehr oder weniger abweichen (bspw. Nichtlinearitäten, Vignettierung, Dunkelsignal, Smearfehler u. v. m.). Diese Eigenschaften werden in einem Kalibrierdatensatz beschrieben und in der Bildauswertungssoftware hinterlegt.

Somit können nach der Bilderfassung diese Abweichungen korrigiert werden, und man erhält Signalwerte im Bild, die der Leuchtdichte in der Szene äquivalent sind. Selbstverständlich müssen diese Signalwerte mit unterschiedlich hohen Messunsicherheiten bewertet werden. Auf dem Markt existierende LMK's besitzen ähnliche Eigenschaften, wie punktweise messende Leuchtdichtemesser der Klasse B nach DIN 5032 Teil 7.

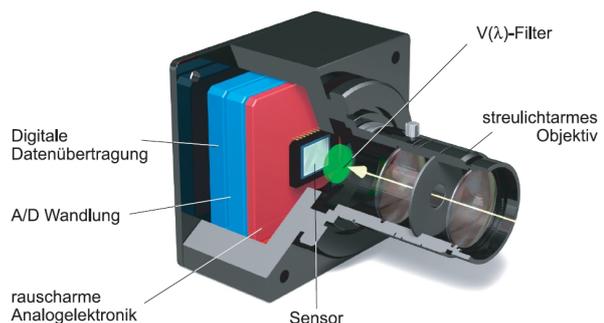


Abb. 1: Leuchtdichtemesskamera LMK98-4



Abb. 2: Leuchtdichtemesskamera LMK mobile mit Halbraumobjektiv

LMK's besitzen heute Bildpixelauflösungen von 1,5 - 16 Megapixel. Das bedeutet ungefähr  $1380 \times 1080$  bis  $4096 \times 4096$  Leuchtdichtemesswerte in einem Messbild. Viele LMK's können mit Wechselobjektiven eingesetzt werden. Dadurch wird das erfassbare Bildfeld und die Winkelauflösung beliebig gestaltbar. Je nach eingesetztem Objektiv (Weitwinkel- bzw. Teleobjektiv) ergeben sich entsprechende Winkelauflösung  $\Delta\varphi, \Delta\vartheta$  pro Bildpixel, d.h. für jeden einzelnen Messwert.

Für einige Messaufgaben ist der gesamte Halbraum zu bewerten. Durch den Einsatz von speziellen Halbraumobjektiven (Abbildung 2) kann dies ebenfalls in nur einer Messbildaufnahme erfolgen.

### 3.1 Geometrische Abbildung, Raumwinkel

Im Sichtbereich des LMK werden Leuchtdichten  $L_{ij}$  in Abhängigkeit von ihren Positionen gemessen. Die Pixelkoordinaten  $(i, j)$  definieren eindeutig auch den Blickwinkel  $(\varphi, \vartheta)$  in Bezug zur optischen Achse des Systems.

$$\begin{aligned}\vartheta &= f_{\vartheta}(i, j) \\ \varphi &= f_{\varphi}(i, j)\end{aligned}\quad (2)$$

Damit ist für jeden erfassten Pixel sein Leuchtdichtewert  $L$  an der Stelle  $i, j$  im Messbild sowie sein Beobachtungswinkel  $(\varphi, \vartheta)$  und über die Winkelinkremente  $\Delta\varphi, \Delta\vartheta$  auch sein Raumwinkelanteil  $\Delta\Omega_{ij}$  bekannt (Tabellen 1 & 2).

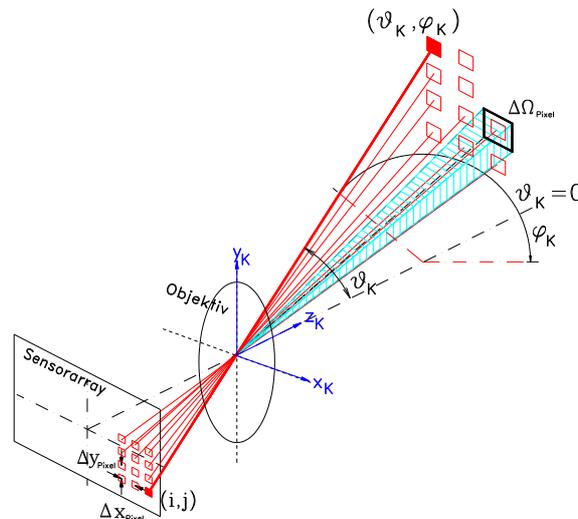


Abb 3: Zusammenhänge der geometrischen Abbildung

Somit ergeben sich für ein ideales Objektiv, die in Gleichung (3) aufgeführten Zusammenhänge:

$$\begin{aligned}\Delta\Omega_{\text{Pixel } i, j} &= \frac{\Omega_0 \cdot A_{\text{Pixel}} \cdot \cos \vartheta}{r^2}; \quad r = \frac{f}{\cos \vartheta} \\ \Delta\Omega_{\text{Pixel } i, j} &= \Omega_0 \cdot k \cdot \cos^3 \vartheta\end{aligned}\quad (3)$$

Objektiv Sensorauflösung	$f'=100 \text{ mm}$	$f'=25 \text{ mm}$	$f'=8 \text{ mm}$	Halbraum- objektiv
1 MP	0,22	0,89	2,77	9,83
5 MP	0,12	0,45	1,48	5,26

Tab. 1: Winkel  $\Delta\vartheta$  pro Pixel in Winkelminuten (in Bildmitte)

Objektiv Sensorauflösung	$f'=100 \text{ mm}$	$f'=25 \text{ mm}$	$f'=8 \text{ mm}$	Halbraum- objektiv
1 MP	1,4E-05	2,3E-04	2,2E-03	2,8E-02
5 MP	4,1E-06	6,5E-05	6,4E-04	8,0E-03

Tab. 2: Raumwinkel  $\Delta\Omega$  pro Pixel in Steradian (in Bildmitte)

Für viele Objektive sind die tatsächlichen Bildfeldwinkelverhältnisse komplizierter (optische Verzeichnung). Diese Zusammenhänge können aber gemessen und in Form von Softwaredatensätzen für  $\vartheta = f_{\vartheta}(i, j)$ , bzw.  $\varphi = f_{\varphi}(i, j)$  und  $\Delta\Omega = f_{\Omega}(i, j)$ , bspw.

als Korrekturbild abgelegt und für die Bestimmung geometrischer Messdaten (Blickwinkel, Raumwinkel) verwendet werden. LMK's liefern somit in einem Messbild für jedes Pixel  $(i, j)$  einen Messwert  $L(\vartheta, \varphi)$  und den zugehörigen Raumwinkel  $\Delta\Omega$ .

#### 4 Erfassung der Leuchtdichtebilder

Die zu erfassenden Leuchtdichten haben einen extremen Dynamikumfang. Die Leuchtdichten der Blendquellen können durchaus im Bereich von  $\gg 10^4 \text{ cd/m}^2$  liegen ( $\gg 10^6 \text{ cd/m}^2$  bei direkter Sicht ins Leuchtmittel). Die Umfeldleuchtdichten können im Gegensatz dazu im Messbereich von ungefähr  $10^{-3} \text{ cd/m}^2$  liegen.

LMK's erlauben es über die Belichtungszeitsteuerung und durch den Einsatz von Graufiltern einen sehr großen Dynamikumfang abdecken.

Leuchtdichtemessgeräte arbeiten mit einem Abbildungssystem (Objektiv). Ein Objektiv erzeugt auf Grund seines Aufbaus mehr oder weniger Streu- bzw. Falschlicht. Wenn dieser Umstand die Erfassung der Umfeldleuchtdichte in nicht akzeptablen Umfang verfälschen sollte, muss dafür ersatzweise ein weiteres Leuchtdichtebild mit abgedeckter Blendquelle aufgenommen werden (Abbildung 5).

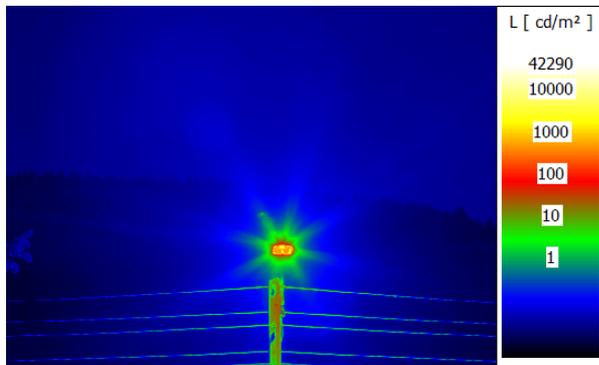


Abb. 4: Blendquelle (Darstellung 7 fach logarithmisch)

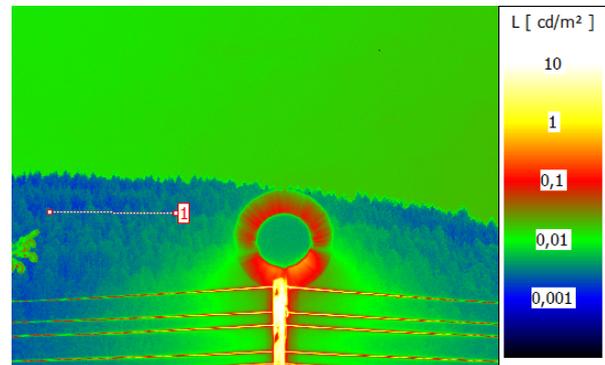


Abb. 5: Erfassung der Umfeldleuchtdichte, Blendquelle abgedeckt, mit Leuchtdichteschnitt zur Darstellung der Auflösung

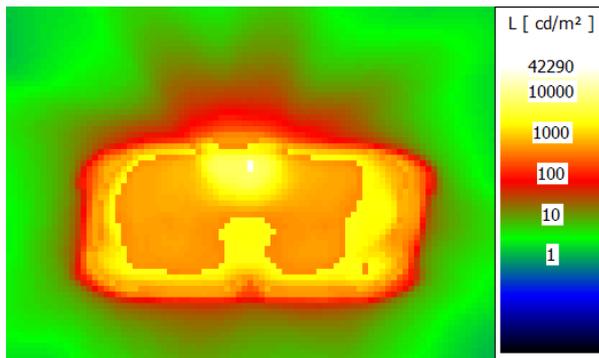


Abb. 6: Blendquelle gezoomte Darstellung

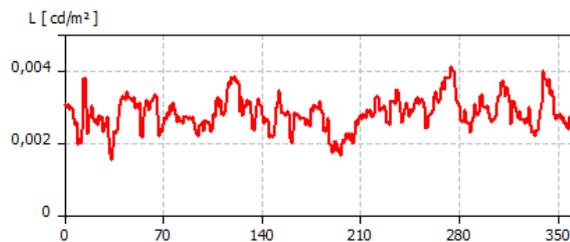


Abb. 7: Darstellung der Leuchtdichten entlang das Schnittes1 in Abb. 5

Bei der Aufnahme sind hinreichend lange Belichtungszeiten zu wählen, damit durch die Modulation der Lichtquellen (50 Hz Wechselstrom oder PWM bei LED-Leuchten) keine Messfehler entstehen ( $> 20$  bis  $100 \text{ ms}$  sind sinnvoll, Anm. des Autors).

Die Leuchtdichtebilder zur Bestimmung der Leuchtdichten der Blendquellen selbst werden mit langen Brennweiten (50 bis  $100 \text{ mm}$ ) erfasst. Dabei muss darauf geachtet den Messbereich richtig einzustellen, damit keine Übersteuerung auftritt. Dazu werden u. a. kalibrierte Vorsatzgraufilter verwendet (bspw. Dichte 3,0 mit Transmissionen von ca.  $0,1 \%$ ). Die Umfeldleuchtdichte bzw. Adaptationsleuchtdichte (bspw.

mittlere Fahrbahnleuchtdichte) werden zumeist mit einer kürzeren Brennweite erfasst (8 bis 18mm). Die Aussteuerung ist so zu wählen, dass die Umfeldleuchtdichten sicher detektierbar sind (Belichtungszeiten bis 1 s).

## 5 Ableiten von Blendungskennzahlen aus Leuchtdichtebildern

Die Leuchtdichten  $L_{ij}$  in den Messbildern können je nach Aufgabenstellung klassifiziert (zugeordnet) werden - **geometrisch** - (bspw. zur Umfeldleuchtdichte in einem Feld von 20° gehörend oder die mittlere Fahrbahnleuchtdichte auf einem abgegrenzten Straßenabschnitt) oder – **photometrisch** - (bspw. größer als eine Schwellenleuchtdichte oder größer als ein Mittelwert im Umfeld). Als Ergebnis sind dann Regionen vorhanden, deren Pixel unterschiedliche Bedeutung haben (zur Blendquelle, zum Umfeld, zum Hintergrund, u. v. m. gehörend). Durch die Aufsummierung aller zu den klassifizierten Pixeln gehörenden Raumwinkelemente  $\Delta\Omega_{ij}$  (bspw. der Blendlichtquelle) ist auch der Raumwinkel der Blendquelle ( $\Omega_{\text{Lichtquelle}}$ ) bekannt.

Die so zugeordneten Messdaten können ähnlich, wie bei der Arbeit mit einem Standardleuchtdichtemesser ausgewertet werden, indem man die mittleren Leuchtdichten  $L_{\text{mittel}}$  der Regionen mit ihren Raumwinkeln  $\Omega_{\text{Lichtquelle}}$  und ihren Richtungen  $\vartheta_s, \varphi_s$  (z.B. Schwerpunkt der Region) nach Gleichung 1 verknüpft.

Eleganter ist die direkte Berechnung für jeden vorhandenen Messwert (Pixel). Mit den Bildverarbeitungsfunktionen in der Auswertungssoftware des LMK's sind diese Verknüpfungen einfach realisierbar und sollen im Folgenden näher erläutert werden.

### 5.1 Beispiel TI-Wert

Am Folgenden Beispiel, der Bestimmung des TI-Werts (Threshold Increment) nach DIN EN13201-3:2003, soll die Messung von Blendungskennzahlen mit einem LMK näher erläutert werden. Der TI-Wert verknüpft die Schleierleuchtdichte am Auge mit der mittleren Fahrbahnleuchtdichte:

$$TI = \frac{65}{(L_{\text{mittel, Fahrbahn}})^{0,8}} \cdot L_S \quad (4)$$

Die äquivalente Schleierleuchtdichte bewertet die, durch die von der Blendquelle am Auge erzeugten, Beleuchtungsstärken und mit ihrer Beobachtungsrichtung  $\vartheta$ .

$$L_S = \frac{c \cdot E_{\text{ver}}}{\vartheta^n} \quad (5)$$

Häufig wird  $n = 2$  verwendet / 2// 3/ und die Ermittlung auf einen Bereich außerhalb der direkten Blickrichtung z.B. für  $\vartheta > 3^\circ$  beschränkt. Andere Bewertungsfunktionen sind gelegentlich im Einsatz. Prinzipiell ergibt sich die Schleierleuchtdichte aber in der Art:

$$L_S = c \cdot E_{\text{ver}} \cdot f(\vartheta) \quad (6)$$

Die vertikale Beleuchtungsstärke  $E_{\text{vert}}$  als Messgröße (bspw. bei der Beurteilung der Raumaufhellung) errechnet sich bei horizontaler Ausrichtung des LMK aus der Leuchtdichte und dem Raumwinkel der Lichtquelle, verknüpft mit dem Lichteinfallswinkel. Nach dem photometrischen Grundgesetz gilt:

$$E_{vert} = \sum_{i,j} L(i,j) \cdot \Delta\Omega(i,j) \cdot \cos\vartheta \quad \text{für } \forall(i,j) \ni \text{Lichtquelle} \quad (7)$$

Damit kann auch die äquivalente Schleierleuchtdichte  $L_s$ , in ähnlicher Vorgehensweise, allerdings mit einem anderen Wichtungsbild (Abbildung 8), bestimmt werden.

$$L_s = \sum_{i,j} L(i,j) \cdot \Delta\Omega(i,j) \cdot \frac{\cos\vartheta_{i,j}}{\vartheta_{i,j}^2} \quad \text{für } \forall(i,j) \ni \text{Lichtquelle und } \vartheta > 3^\circ \quad (8)$$

Das bedeutet jeder, einer Blendquelle zugeordneter Leuchtdichtewert, muss mit einem ortsabhängigen Faktor multipliziert werden. Die Ergebnisse sind zu addieren. Diese Faktoren können in einem Wichtungsbild zusammengefasst abgelegt werden. Das vereinfacht diese Multiplikation in nur einer Bildverarbeitungsoperation. Die Zuordnung der Pixel zur Blendquelle erfolgt mit einem Schwellwertstatistikobjekt, d. h. der Vorgabe eines Leuchtdichteschwellwertes, in der Auswertungssoftware (Abbildung 9).

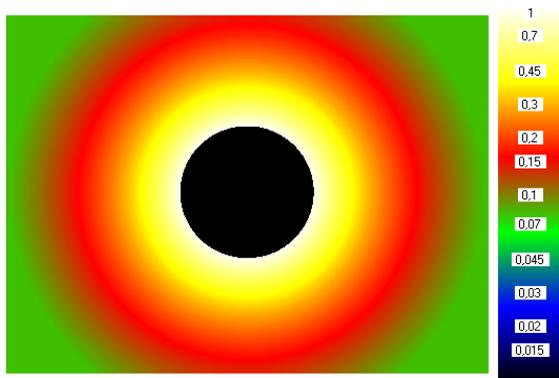


Abb 8: Wichtungsbild für die Schleierleuchtdichte mit Objektiv  $f= 25\text{mm}$

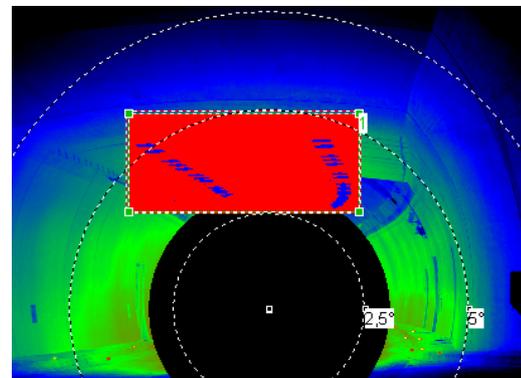


Abb 9: gewichtetes Leuchtdichtebild mit separierten Blendquellen –  $LS = 0,21 \text{ cd/m}^2$

Aus der Schleierleuchtdichte und der mittleren Fahrbahnleuchtdichte kann dann sehr einfach die Schwellwerterhöhung nach EN13201-3:2003 bestimmt werden.

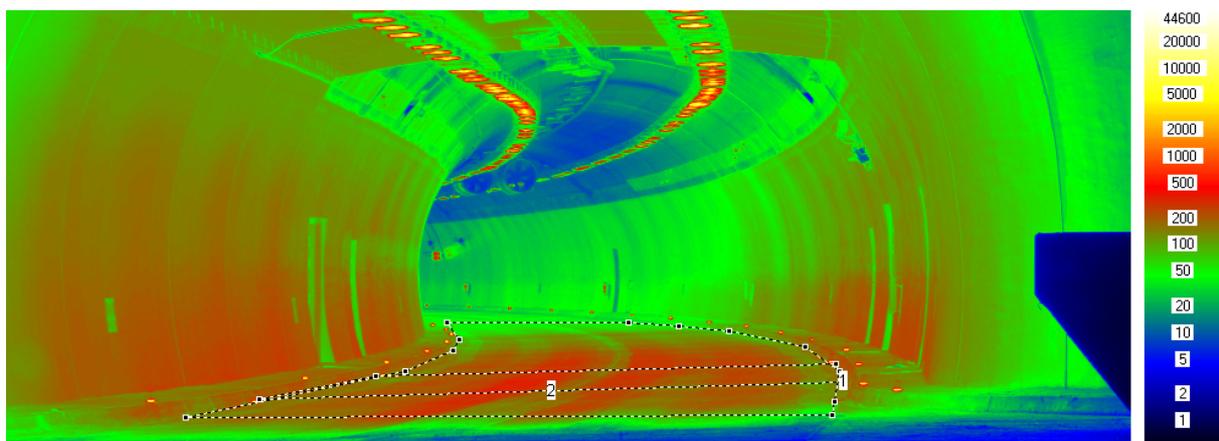


Abb 10: Leuchtdichtebild mit markierten Fahrbahnregionen – mittlere Fahrbahnleuchtdichte  
Region 1:  $L = 188,1 \text{ cd/m}^2$ ; Region 2:  $L = 226,9 \text{ cd/m}^2$

Für die in Abbildung 10 gemessene Tunnelleinfahrt ergibt sich:

$$L_S = 0,21 \quad (9)$$

$$L_{\text{mittel}} = 226,9 \quad \Rightarrow \quad TI = 17,8\%$$

## 5.2 Weitere Blendungskennzahlen

Durch die entsprechende Gestaltung der Wichtungsbilder (bspw.  $\Delta\Omega(i, j) \cdot \cos\vartheta$  für die Beleuchtungsstärke bei der Raumaufhellung, oder die Verknüpfung mit dem Positionsindex nach IES) sowie weitere Bildverarbeitungsoperationen (bspw. die Multiplikation des Leuchtdichtebildes mit sich selbst ( $L_{ij}^2$ ), angewandt bei der Bestimmung von UGR-Werten) lassen sich auch beliebig andere Blendungskennziffern ermitteln oder entwickeln.

## 6 Fazit

Bei Verwendung von LMK's werden die erforderlichen Informationen (photometrische und geometrische) in den Leuchtdichtebildern erfasst. Der Einsatz unterschiedlicher Sensoren und verschiedener Objektive erlaubt es unterschiedliche Auflösungen zu realisieren. Der Messbereich eines LMK reicht von  $10^{-3}$  cd/m<sup>2</sup> bis zur Erfassung der Leuchtdichten des Leuchtmittels (bspw. dem sogenannten „Hotspot“ in Bogenlampen  $\gg 10^6$  cd/m<sup>2</sup>).

Die Verknüpfung der photometrischen mit den geometrischen Messdaten entsprechend der jeweiligen „Blendungsformel“ kann in der Auswertesoftware der LMK's implementiert werden. Der Aufwand für die Datenauswertung ist damit extrem reduziert. Bei geeigneter Gestaltung der Auswertesoftware stehen nach der Bildaufnahme die Blendungskennzahlen unmittelbar zur Verfügung.

Dadurch sind LMK's das geeignete Messsystem für Alle, die auf diesem Gebiet tätig sind (Lichtplaner, Gutachter, Behörden).

Vielfältige Ergebnisse und Erfahrungen aus den Bereichen künstliche Straßenbeleuchtung, Lichtimmissionsbewertung sowie der Anwendung des UGR & DGP Verfahrens liegen vor.

## 7 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/ Schmidt, F.; Krüger, U.; Wolf, St. „Applikationen der orts aufgelösten Licht- und Farbmessung“ Licht 2004, Dortmund 19.9.-22.9.2004
- / 6/ Krüger, U. „Ausgewählte Aspekte der orts aufgelösten Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen“ Dissertation TU Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2004
- / 7/ 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

- / 8/ Krüger, U.; Schmidt, F.; Wolf, St. „Applications of image resolved light and colour measurement“ Light & Engineering 3/2005, Znack Publishing House Moscow
- / 9/ Schmidt, F.; Krüger, U. „Ortsaufgelöste Licht- und Farbmessung – Technische Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten in der lichttechnischen Praxis“ Tagungsband LUX EUROPA 2005, 10. Europäischer Lichtkongress Berlin, 19.9.- 21.9.2005
- / 10/ Schmidt, F.; Krüger, U.; Porsch, T.; Erfassung von Blendwerten mittels bildauflösender Leuchtdichtemesstechnik, LICHT 2006, Bern 10.-13.09.2006, Tagungsband 8 S
- / 11/ Porsch, T.; Schmidt, F.: Blendungsbewertung mit bildauflösender Lichtmesstechnik in Theorie und Praxis, Lux-Junior 2007, Ilmenau
- / 12/ 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
- / 13/ 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
- / 14/ Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen LiTG-Publ. 12.3 (2011) (ISBN 978-3-927787-35-3)