

Blendungsbewertung mit bildauflösender Lichtmesstechnik in Theorie und Praxis

Porsch, Tobias; Schmidt, Franz

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH; Werner-von-Siemens-Straße 10; 98693 Ilmenau

info@technoteam.de

1 Einleitung

Die visuelle Informationserfassung über das menschliche Auge kann durch zu hohe Leuchtdichten im Umfeld gestört werden. Hauptsächlich sind dafür Streueffekte verantwortlich. Diese Effekte sind individuell von vielen physiologischen und auch psychischen Faktoren abhängig, und werden unter dem Begriff der 'Blendung' zusammengefasst. [1,... 3]

Um physiologische Blendeffekte messen zu können, wird zunächst versucht die physiologischen Eigenschaften des Auges mit mathematischen Formeln zu beschreiben.

Sehr einfach betrachtet, erfasst das Auge mit seinen Sensoren (Sehzellen) Bilder, d.h. Leuchtdichten, bzw. Farben in unterschiedlichen Blickrichtungen $f(\varphi, \vartheta)$ im Raum.

Aber Aufgrund des komplexen Aufbaus des Auges müssen unterschiedliche Sehaufgaben differenziert voneinander betrachtet werden. Somit werden zur Beurteilung der Blendwirkung von Lichtquellen, je nach Anwendung unterschiedliche Kenngrößen und Messmethoden angewandt [4, ... 7]:

- Beleuchtungsstärken zur Raumaufhellung an Lichteintrittsflächen (Fenster, Balkon)
- Maximal tolerable Leuchtdichte einer Blendlichtquelle im Außenbereich (nach LAI)
- Äquivalente Schleierleuchtdichte als Kenngröße im Außenbereich
- Schwellwerterhöhung TI (Threshold Index) im Straßenverkehr
- Unified Glare Ratio (UGR) als Blendparameter in Innenräumen
- uvm.

Grundlage dieser Kenngrößen sind primär als Blendleuchtdichten eingestufte Leuchtdichten $L(\varphi, \vartheta)$ im Sichtfeld des Beobachters über die Verknüpfung mit ihrer Position im Raum (φ, ϑ) und ihrer flächigen Ausbreitung, dem Raumwinkel Ω unter Berücksichtigung des Adaptationszustandes des Auges, d.h. der Umgebungshelligkeit (Umfeldleuchtdichte).

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

$L_{\text{Lichtquelle}}$ = Leuchtdichte der Lichtquelle

L_{Umfeld} = Leuchtdichte des Umfeldes

$\Omega_{\text{Lichtquelle}}$ = Raumwinkel unter dem die Lichtquelle erscheint

ϑ, φ = Beobachtungswinkel der Blendquelle ($\vartheta = 0^\circ$ entspricht der Blickrichtung)

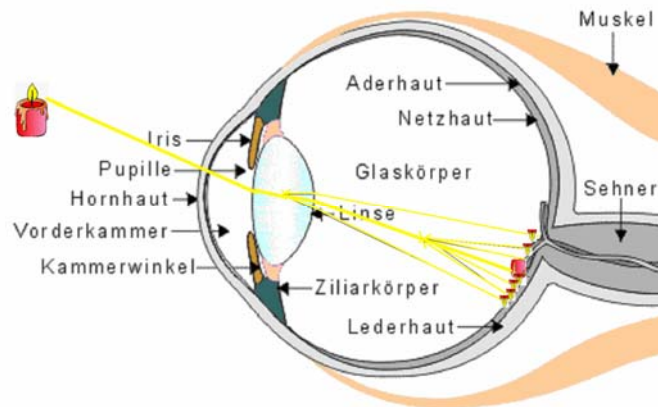


Bild 1: Schnitt durch das menschliche Auge

In der gängigen Praxis werden zur Bestimmung von Blendwerten die Leuchtdichten der Blendquellen mit Leuchtdichtemessern gemessen und ihre Positionen mit einem Winkelmesser (z.B. Theodolit) erfasst. Mit der Verfügbarkeit einer bildauflösenden Leuchtdichtemesskamera (LMK - Videophotometer) [8, ... 13] können all diese Daten mit nur einer Aufnahme erfasst werden. Die Standardsysteme arbeiten heute mit Auflösungen von mind. 1300 x 1000 Leuchtdichtemesswerten pro Bild. Systeme mit 4900 * 3280 Pixeln sind inzwischen verfügbar. Je nach eingesetztem Objektiv (Weitwinkel- bzw. Teleobjektiv) ergibt sich damit eine entsprechende Winkelauflösung $\Delta\varphi, \Delta\vartheta$ für die einzelnen Messwerte (siehe Bild 2).

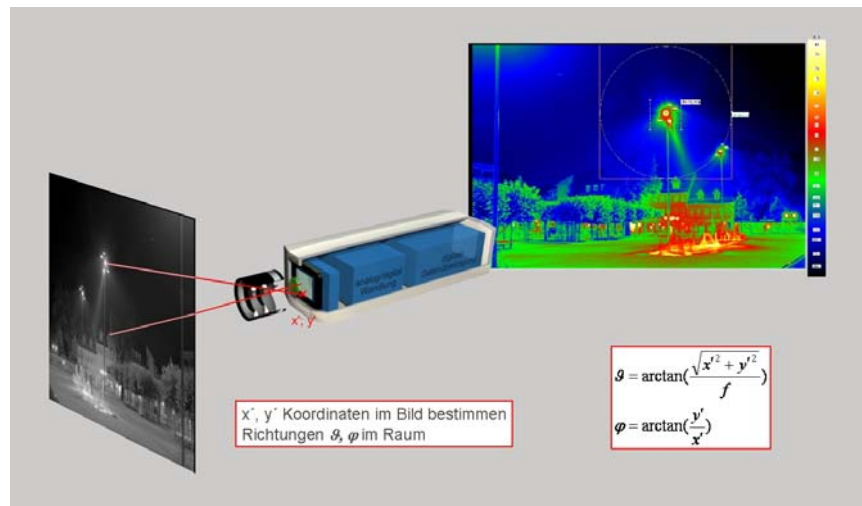


Bild 2: Prinzip Leuchtdichtemesskamera



Bild 3: Leuchtdichtemesskamera mit Halbraumobjektiv

Für viele Messaufgaben ist der gesamte Halbraum $\pm 90^\circ$ zu erfassen. Durch den Einsatz von speziellen Halbraumobjektiven (siehe Bild 3) kann dies auch mit einer einzigen Aufnahme erfolgen. Sollte die, sich damit ergebende, Winkelauflösung ($\Delta\varphi, \Delta\vartheta$) nicht ausreichen, können Leuchtdichtemesskameras mit höherer Auflösung (bis 16 Megapixel) eingesetzt werden.

Zur Beurteilung der physiologischen und psychologischen Blendwirkung von Beleuchtungsanlagen, werden je nach Anwendung eine Vielzahl von Kenngrößen und Messmethoden angewandt oder miteinander kombiniert.

Grundlage für diese Verfahren sind immer relative Zusammenhänge zwischen der Umgebungshelligkeit und der Helligkeit der Lichtquelle bzw. Lichtanlage in Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel.

2 Zusammenhänge in der geometrischen Abbildung, Raumwinkel

Im Sichtbereich der Leuchtdichtekamera LMK werden Leuchtdichten $L_{i,j}$ in Abhängigkeit von ihren Positionen gemessen. Die Pixelkoordinaten (i, j) definieren eindeutig auch Winkel in Bezug zur optischen Achse der LMK.

$$\begin{aligned}\vartheta &= f_{\vartheta}(i, j) \\ \varphi &= f_{\varphi}(i, j)\end{aligned}\tag{3}$$

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

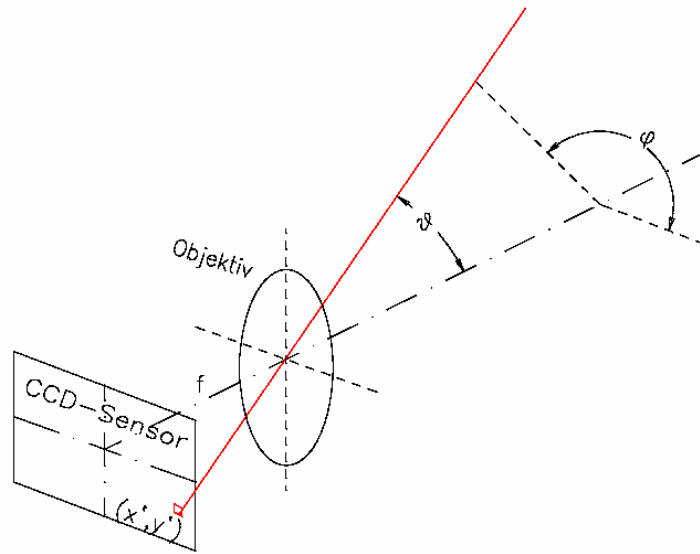


Bild 4: Zusammenhänge der geometrischen Abbildung

$$\Delta\Omega_{\text{Pixel } i,j} = \frac{\Omega_0 \cdot A_{\text{Pixel}} \cdot \cos \vartheta}{r^2}; \quad r = \frac{f}{\cos \vartheta} \quad (4)$$

$$\Delta\Omega_{\text{Pixel } i,j} = \Omega_0 \cdot k \cdot \cos^3 \vartheta$$

Ist die Verzeichnung eines Objektivs dabei nicht vernachlässigbar, muss diese durch eine Korrektur mit berücksichtigt werden. Üblicherweise wird dieser Zusammenhang dann in Form eines zusätzlichen Datensatzes abgelegt $\vartheta, \varphi = f(i, j)$. Durch eine Koordinatentransformation können damit auch winkeltreue Leuchtdichtebilder erzeugt werden.

Die Leuchtdichten im Bild können dann je nach Aufgabenstellung geometrisch oder photometrisch (z.B. größer als eine Schwellenleuchtdichte oder größer als ein Mittelwert im Umfeld) klassifiziert werden. Im Ergebnis sind dann Regionen vorhanden, deren Pixel unterschiedliche Bedeutung haben (zur Blendquelle, zum Umfeld, zum Hintergrund usw. gehörend). Mit der Aufsummierung aller Pixelflächen solch einer Region im Bild (z.B. Blendlichtquelle) ist damit dann auch deren Raumwinkelanteil ($\Omega_{\text{Lichtquelle}}$) bekannt.

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

Eleganter ist allerdings die direkte Berechnung für jeden vorhandenen Messwert (Pixel). Mit den Bildverarbeitungsfunktionen in der LMK2000 Software für die Leuchtdichtemesskameras sind diese Verknüpfungen einfach realisierbar und sollen im Folgenden näher erläutert werden.

3 Ableitung von Blendparametern aus den Leuchtdichtebildern

3.1 Mittlere Leuchtdichte

In vielen Fällen ist die mittlere Leuchtdichte in definierten Feldern (z.B. 20° Umfeld) eine Messgröße (z.B. für die Helligkeitssteuerung einer Tunneleinfahrtstrecke) oder Bezugsgröße (Blendungsbewertungen). Die mittlere Leuchtdichte in Leuchtdichtebildern wird in allen definierten Regionen in einem Leuchtdichtebild sofort zur Verfügung gestellt.

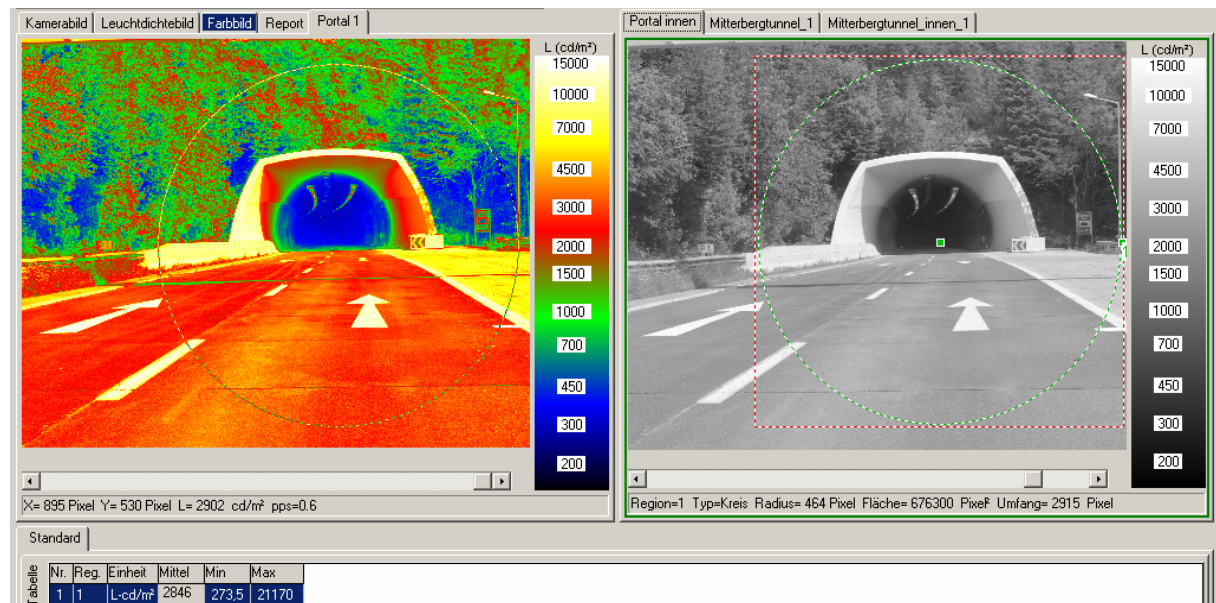


Bild 5: Leuchtdichtebild (Darstellung 2fach logarithmisch; links pseudocoloriert) mit Region 20° - mittlere Leuchtdichte in der Region 2846 cd/m²

3.2 Vertikale Beleuchtungsstärke

Der von verschiedenen Lichtquellen am Auge des Beobachters erzeugten vertikalen Beleuchtungsstärke kommt für viele Blendungsbewertungsverfahren eine zentrale Bedeutung zu. Die vertikale Blendbeleuchtungsstärke E_{vert} als Blendparameter ergibt sich bei horizontaler Ausrichtung der LMK aus den Leuchtdichten der Blendquellen und ihren Raumwinkeln. Nach dem photometrischen Grundgesetz gilt:

$$E_{vert} = \sum_{i,j} L(i,j) \cdot \Delta\Omega(i,j) \cdot \cos \vartheta \quad \text{für } \forall(i,j) \ni \text{Lichtquelle} \quad (5)$$

$$\text{mit } \Delta\Omega_{Pixel\ i,j} = \Omega_0 \cdot k \cdot \cos^3 \vartheta$$

Das bedeutet jeder Pixel ist mit einem orts- bzw. pixelabhängigen Faktor zu multiplizieren. Werden diese ortsabhängigen Faktoren $k \cdot \cos^3 \vartheta(i,j)$ in einem Bild, innerhalb der LMK2000 Software abgelegt, so lässt sich der Zusammenhang aus Gleichung 5 einfach über die Multiplikation des aufgenommenen Messbildes mit diesem Wichtungsbild (siehe Bild 6) ausrechnen. Werden weitwinklige Objektive eingesetzt, ist gegebenenfalls mit deutlichen Verzeichnungen zu rechnen. Die Zusammenhänge nach Gleich (5) werden dann komplexer, können aber ebenfalls in einem entsprechenden Wichtungsbild hinterlegt werden.

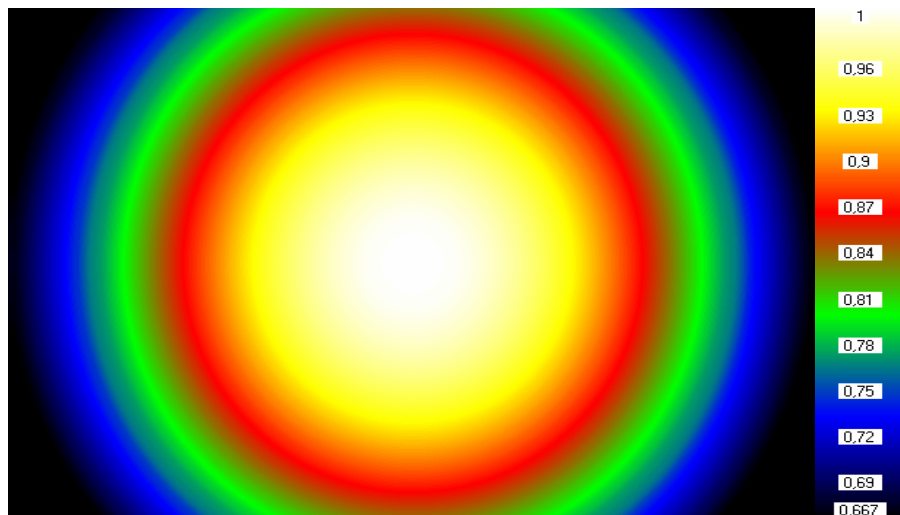


Bild 6: Wichtungsbild für die vertikale Beleuchtungsstärke für ein Objektiv $f= 8\text{mm}$ mit dem mathematischen Zusammenhang nach Gleichung 5

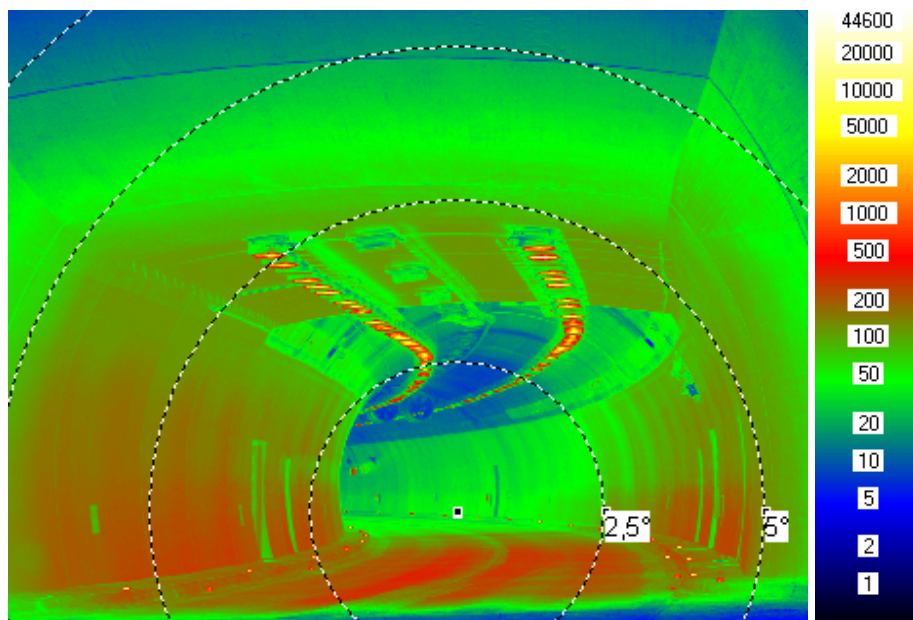


Bild 7: Leuchtdichtebild einer Tunnelleinfahrt Darstellung 5-fach logarithmisch

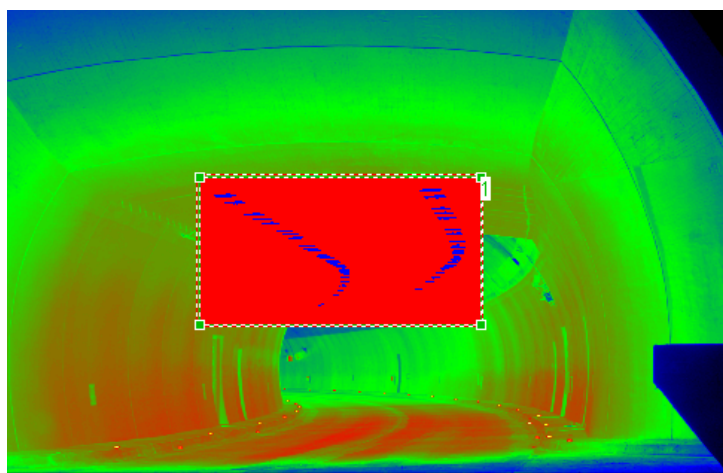


Bild 8: Separierung der Blendquellen über ein Schwellwertobjekt - Vertikale Beleuchtungsstärke hervorgerufen durch die Blendquellen = 0,41 lx

Die Zuordnung von Bildpixeln zu den Blendquellen kann über ein Leuchtdichteschwellwertobjekt (Bild 8) in der LMK2000 Software erfolgen. Die Aufsummierung der leuchtenden Anteile der Blendquelle, bzw. die Multiplikation der mittleren Blendleuchtdichten mit ihren Raumwinkeln ist ebenfalls Bestandteil der LMK2000 Software. Damit stehen die Beleuchtungsstärken die jede Blendquelle an der Beobachterposition hervorruft einzeln oder als Summe unmittelbar zur Verfügung.

3.3 Schleierleuchtdichte

Die äquivalente Schleierleuchtdichte wird gewichtet durch die von den Blendquellen am Auge hervorgerufenen Beleuchtungsstärken, mit ihrer Einfallsrichtung ϑ .

$$L_S = \frac{c \cdot E_{vert}}{\vartheta^n} \quad (6)$$

Häufig wird $n = 2$ verwendet [1, 2] 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:

$$L_S = c \cdot E_{vert} \cdot f(\vartheta) \quad (7)$$

Damit kann die äquivalente Schleierleuchtdichte L_S , in gleicher Vorgehensweise wie in Pkt. 3.2 (allerdings mit anderem Wichtungsbild, z.B. Bild 9) bestimmt werden.

$$L_S = \sum_{i,j} L(i,j) \cdot \frac{\Omega_0 \cdot k \cdot \cos^3 \vartheta_{i,j}}{\vartheta_{i,j}^2} \quad \text{für } \forall(i,j) \ni \text{Lichtquelle und } \vartheta > 3^\circ \quad (8)$$

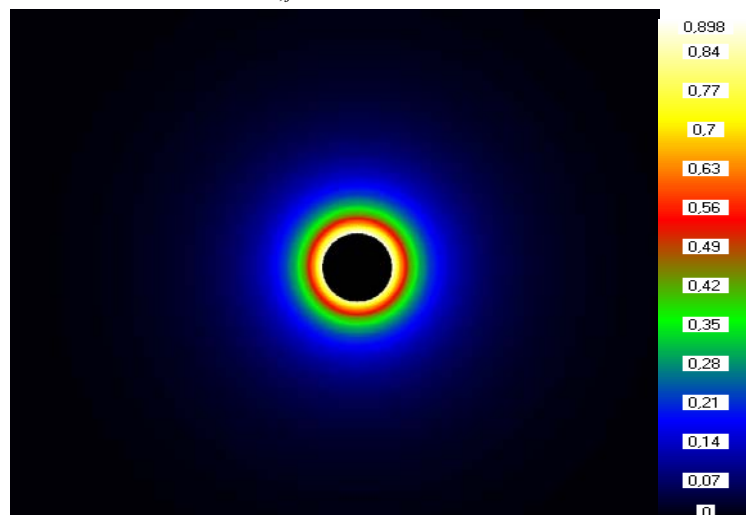


Bild 9: Wichtungsbild für die Schleierleuchtdichte nach Gleichung 8 für ein Objektiv $f = 8\text{mm}$

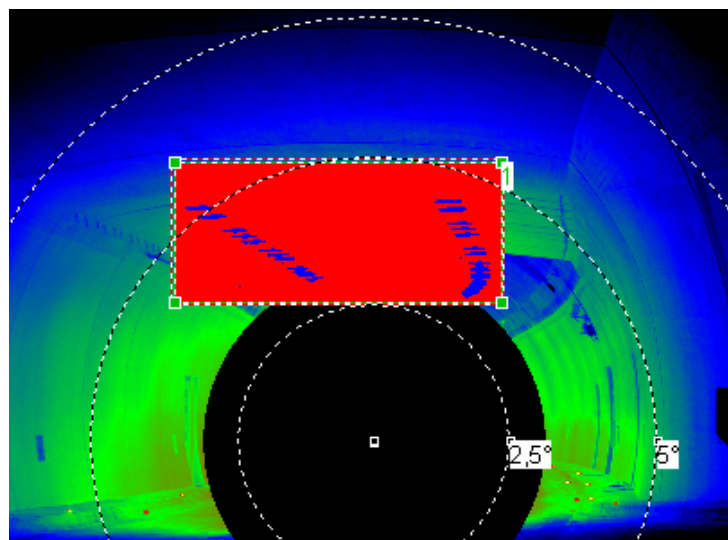


Bild 10: gewichtetes Leuchtdichtebild mit separierten Blendquellen – $L_S = 0,21 \text{ cd/m}^2$

3.4 Schwellwerterhöhung TI

Aus der Schleierleuchtdichte (Messung nach Pkt. 3.3) und der mittleren Fahrbahnleuchtdichte

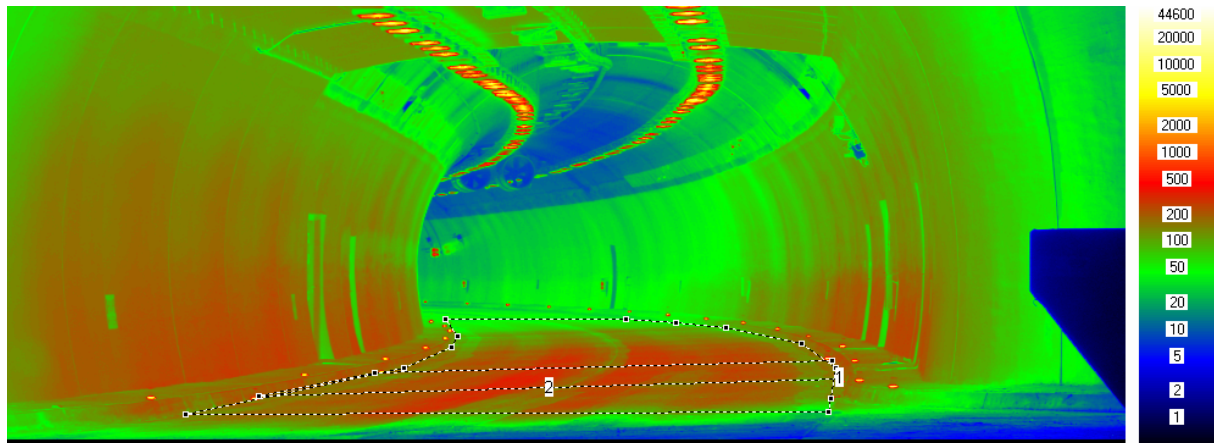


Bild 11: Leuchtdichtebild mit markierten Fahrbahnregionen – mittlere Fahrbahnleuchtdichte

Reg 1	L-cd/m² 188,1
Reg 2	L-cd/m² 226,9

kann dann sehr einfach die Schwellwerterhöhung nach EN13201-3:2003 bestimmt werden.

$$TI = \frac{65}{(L_{\text{mittel, Fahrbahn}})^{0,8}} \cdot L_S \quad (9)$$

Für die in Bild 11 vermessene Tunneleinfahrt ergibt sich:

$$L_S = 0,21$$

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

3.5 Blendungsbewertung mit UGR

Eine Blendungsbewertung von Beleuchtungssituationen nach UGR

$$UGR = 8 \cdot \log\left(\frac{0,25}{L_u} \cdot \sum_i \frac{L_i^2 \cdot \omega_i}{p_i^2}\right) \quad (10)$$

erfordert ebenfalls die Messung/Bestimmung fotometrischer und geometrischer Größen:

L_u	mittlere Leuchtdichte im Umfeld
L_i	mittlere Leuchtdichte der Blendquellen
ω_i	Raumwinkel, unter dem die Blendquellen gesehen werden
p_i	Positionsindex (ergibt sich aus dem Höhenwinkel nach Tabelle).

Bei allen vorherigen Blendparametern (Pkt. 3.23.4) werden die Leuchtdichten der Blendquellen mit ihren Raumwinkeln kombiniert, d.h. die Beleuchtungsstärken am Auge oder die Lichtstromanteile, die ins Auge gelangen, spielen eine wesentliche Rolle. Damit ist die örtliche Auflösung des Messgerätes weniger von Bedeutung. Wichtig ist das über die Messalgorithmen „alles Licht“ der Blendquelle eingesammelt wird. Bei grober Auflösung werden die Leuchtdichten der Blendquellen gegebenenfalls „verschmiert“, die gemessenen Leuchtdichten selbst werden dadurch kleiner, aber der „verschmierte“ Lichtfleck wird größer, so dass das gemessene Produkt Leuchtdichte * Raumwinkel weitgehend unabhängig von der örtlichen Auflösung gleich bleibt.

Bei der Blendungsbewertung nach UGR werden aber das Quadrat der Leuchtdichte mit dem Raumwinkel bewertet. Damit kommt der örtlichen Auflösung des Leuchtdichteessgerätes eine wesentliche Bedeutung zu.

Nach Wolf [14] beträgt der für die Erfassung von UGR Blendungskennzahlen notwendige kleinste Raumwinkel $\Omega = 0,0003\text{sr}$. Somit ergibt sich ein minimaler halber Öffnungswinkel von $9,8\text{ mrad}$ bzw. $0,56^\circ$. Des Weiteren tritt laut CIE bei einer Abweichung von weniger als einer UGR Einheit noch kein merklicher Blendungsunterschied auf. Demzufolge wird von einem zulässigen $\Delta\text{UGR} = 1$ ausgegangen.

Mit der Annahme dieser Bedingung und dem Einsetzen der minimal notwendigen Raumwinkelauflösung ergibt sich somit eine minimal notwendige Winkelauflösung von $4,8'$ pro Pixel bei kreisförmigen Leuchten und $4,3'$ pro Pixel bei rechteckigen Leuchten für die Erfassung des Raumwinkels. Wobei diese Größe aus dem Verhältnis der Rand- zu der Gesamtpixelanzahl resultiert.

Geht man von der Skalierung des Positionsindex als Anforderung an die nötige Winkelauflösung für die UGR-Messung aus so sind die dafür nötigen Toleranzen um ein Vielfaches größer. Zusammenfassend nennt Wolf eine minimal nötige Winkelauflösung von $3 - 10$ Bogenminuten für die Bestimmung des UGR-Wertes.

Bei Verwendung der LMK mobile advanced (modifizierte Canon EOS 350D) mit einer Auflösung von 1737×1156 Pixel für eine Leuchtdichteaufnahme mit einem Sigma FishEye Objektiv wird ein Bildfeld mit $\pm 84^\circ$ horizontal und $\pm 52^\circ$ vertikal erzielt. Die Winkelauflösung einer LMK mobile advanced mit FishEye Objektiv beträgt $5,9'$ pro Pixel.



Bild 11: Leuchtdichtemesskamera LMK mobile advanced ausgerüstet mit Sigma FishEye Objektiv

Der Positionsindex für die UGR Messung wird nach Guth ist für eine maximalen halben horizontalen Winkel von ca. 72° und einen maximalen halben vertikale Bildfeldwinkel von 63° definiert.

Somit ist dieses Messsystem LMK mobile advanced aufgrund seines Bildfeldes, wie auch der örtlichen Auflösung sehr gut für die UGR Messung geeignet.

3.5.1 Koordinatentransformation $x, y \Leftrightarrow \vartheta, \varphi$

Durch Verwendung eines FishEye - Objektives an der LMK mobile advanced wird nahezu der gesamte Halbraum auf den Bildsensor abgebildet. Dabei gelten für die Bildkoordinaten folgende Vereinbarungen (siehe Bild 12):

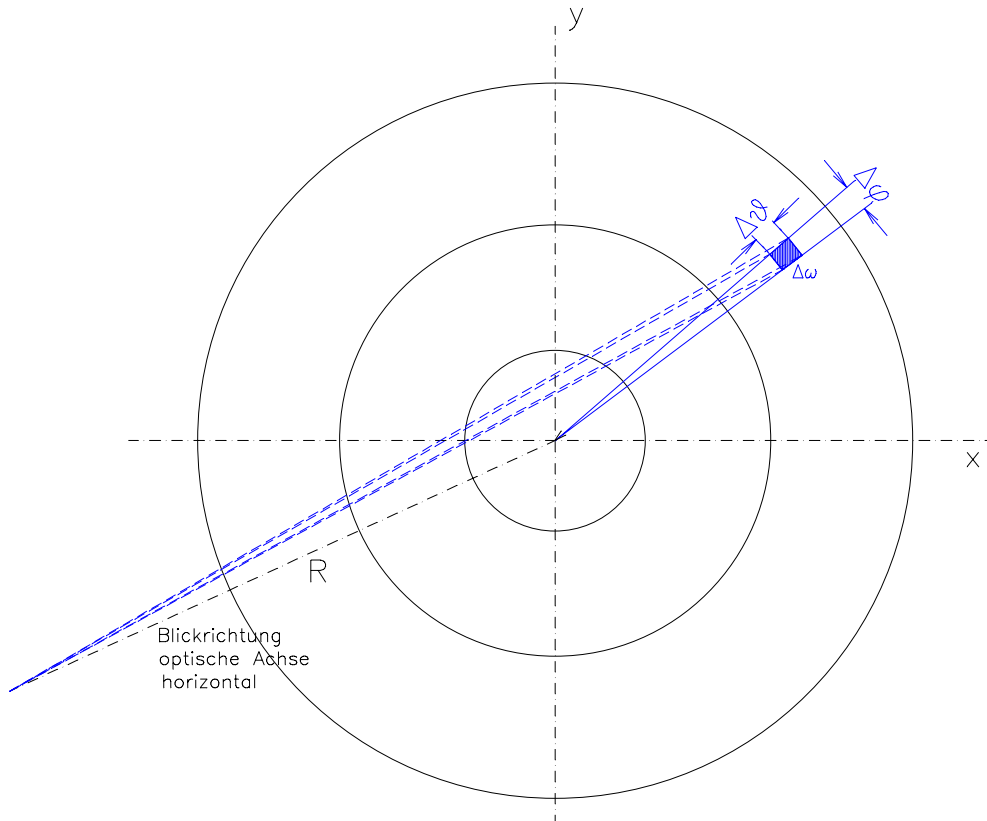


Bild 12: Darstellung des Winkelkoordinatensystem mit Bezug auf die optische Achse zur LMK

Pixelkoordinaten x, y mit $x=0; y=0$ in der optischen Achse (Blickrichtung)

Polarkoordinaten ϑ, φ mit der z -Achse in Blickrichtung

Dabei soll $\vartheta = 0$ in der z -Achse gelten. Der Zusammenhang $\vartheta, \varphi = f(x, y)$ ergibt sich aus den Abbildungseigenschaften des Objektivs. Die Abbildung kann sehr gut als rotationssymmetrisch angesehen werden, und so gilt

$$\varphi = \arctan \frac{y}{x}. \quad (11)$$

Es muss allerdings beachtet werden, dass mit dem verwendeten Objektiv die Abbildung des Messszenarios nicht winkeläquidistant ist. Der Zusammenhang $\vartheta = f(r) = f(\sqrt{x^2 + y^2})$ ist nichtlinear und kann durch

$$\Delta \vartheta = 0,0674 \cdot r^5 + 0,0619 \cdot r^3 + 0,8872 \cdot r = k_{\vartheta} \cdot \text{Pixel} \quad (12)$$

mit $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

approximiert werden.

3.5.2 Raumwinkelinkrement

Damit ist es weiterführend möglich einen Raumwinkelkoeffizienten pro Pixel in einem Bild abzulegen.

Für die Berechnung von UGR Blendwerten ist der Raumwinkel der Blendquelle (Pixel im Bild) zu bestimmen. Ein Segment mit den Abmessungen $\Delta \varphi, \Delta \vartheta$ hat einen Raumwinkel von

$$\Delta \omega = \Delta \vartheta \cdot \Delta \varphi \cdot \sin \vartheta \quad (13)$$

Solch ein Segment entspricht einer Anzahl von Pixeln $\Delta \vartheta = k_{\vartheta} \cdot Pixel$, siehe Gleichung 12. Für ein konstantes ϑ entspricht der volle Winkel 2π . Solch ein kompletter Umfang ist dann $2\pi \cdot r$ Pixel lang. Für ein Winkелеlement $\Delta \varphi$ gilt also:

$$\Delta \varphi = \frac{Pixel}{r} \quad (14)$$

Damit ergibt sich für den Raumwinkel

$$\Delta \omega = \frac{k_{\vartheta}}{r} \cdot \sin \vartheta \cdot Pixel^2$$

oder

$$k_{\omega} = \frac{k_{\vartheta}}{\sqrt{x^2 + y^2}} \cdot \sin \vartheta \quad (15)$$

Dieser Zusammenhang wird in einem Wichtungsbild innerhalb der LMK2000 Software abgelegt.

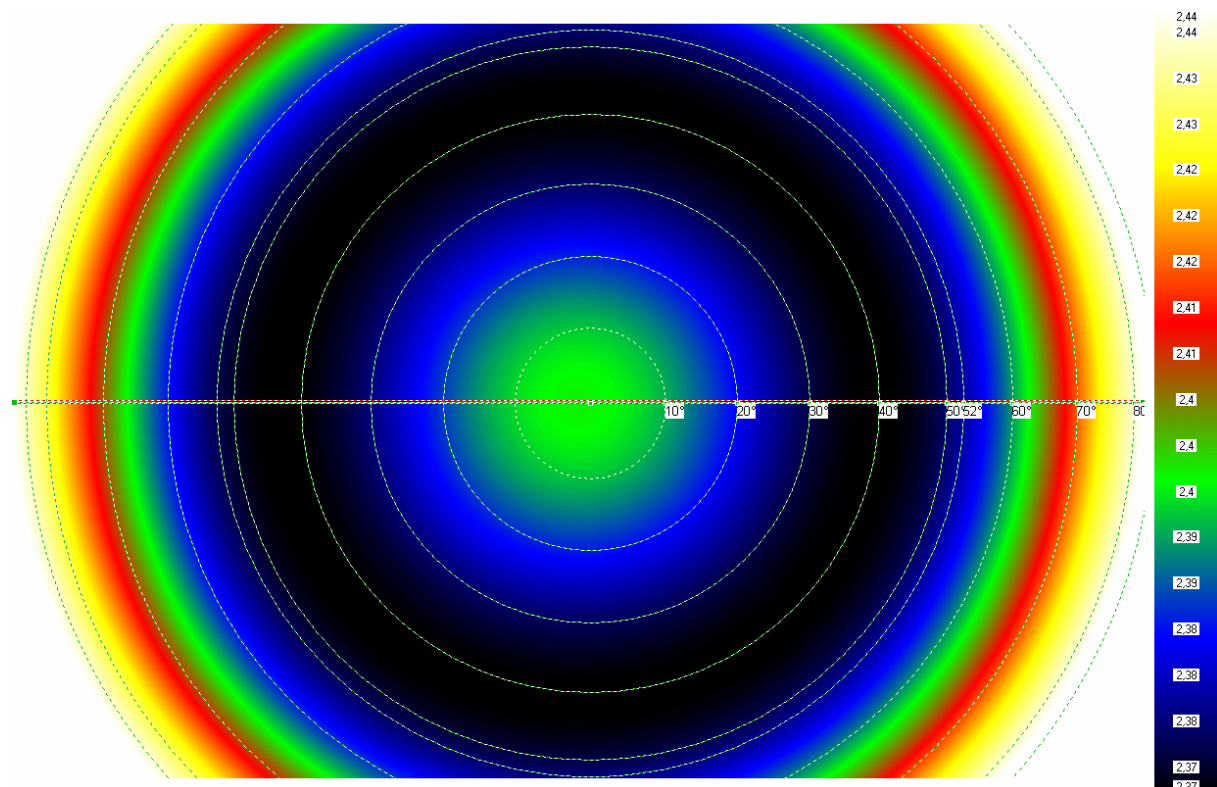


Bild 13: Wichtungsbild mit nichtlinearem Zusammenhang zwischen Pixelfläche und Raumwinkel $k_{\omega} \cdot e^6$

3.5.3 Bestimmung des Positionsindex nach Guth

Ein weiterer notwendiger geometrischer Parameter ist die Position der Blendlichtquelle im Blickfeld des Beobachters. Abhängig von der Position der Lichtquelle wird aus einer Tabelle nach Guth der Positionsindex bestimmt.

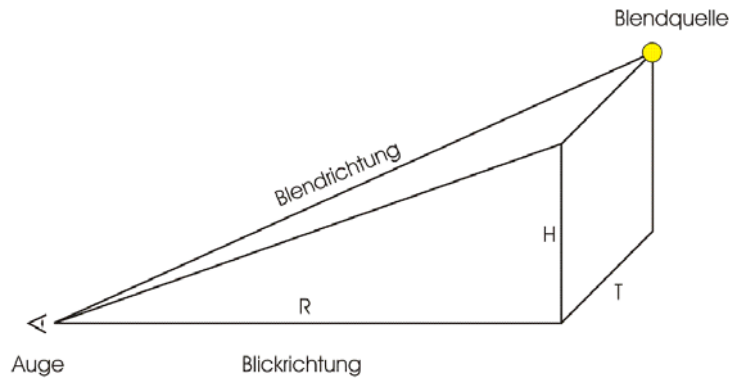


Bild 14: Definition des Positionsindizes nach Guth für die Kennwerte H/R und T/R

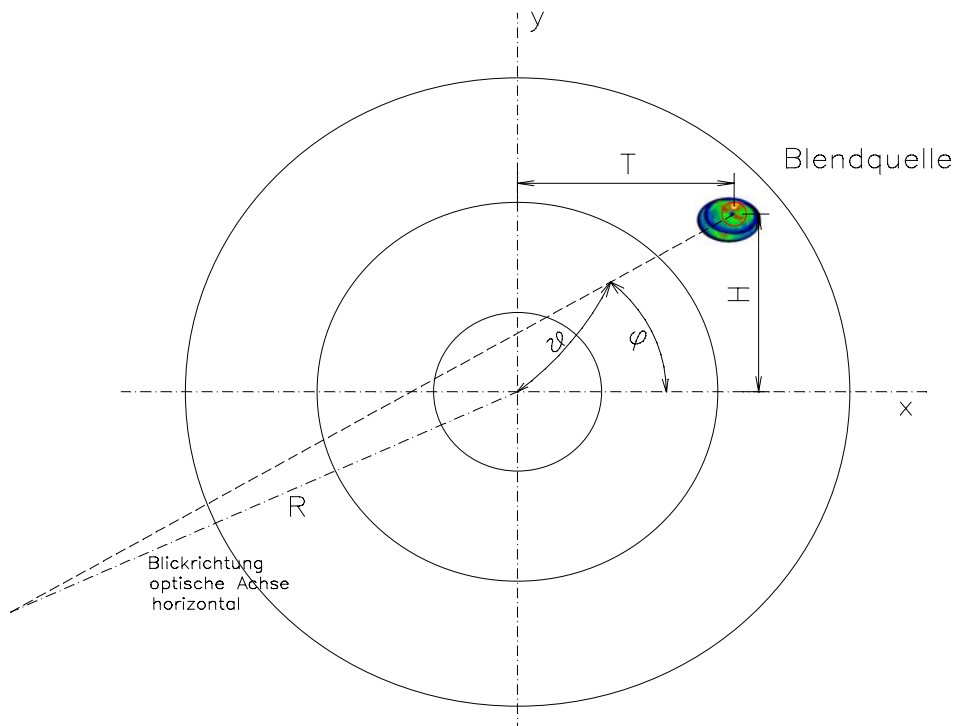


Bild 15: Darstellung der Zusammenhänge für die geometrische Abbildung mit einer Kamera mit Sky-Objektiv

Legt man, wie in Bild 15 dargestellt, eine senkrechte Achse durch den Mittelpunkt des Messbildes als Blickrichtung bzw. optische Achse für die UGR Bestimmung fest, so kann daran anhängend der Positionsindex für die jeweilige Blickrichtung interpoliert werden. Es gilt:

$$R = \frac{r}{\tan \vartheta} \text{ bzw. } r = R \cdot \tan \vartheta \quad (16)$$

Die für den Positionsindex nach Guth erforderlichen Parameter H/R und T/R ergeben sich daraus wie folgt:

$$\frac{H}{T} = \frac{y}{x} \text{ und } H^2 + T^2 = r^2 \Rightarrow H^2 + \left(H \cdot \frac{x}{y}\right)^2 = r^2 \quad (17)$$

$$H = \frac{r}{y \cdot \sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$\frac{H}{R} = \frac{\tan \vartheta}{y \cdot \sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\tan(k_g \cdot \sqrt{x^2 + y^2})}{y \cdot \sqrt{x^2 + y^2}} \quad (18)$$

$$\frac{T}{R} = \frac{\tan(k_g \cdot \sqrt{x^2 + y^2})}{x \cdot \sqrt{x^2 + y^2}}$$

Aus diesen Zusammenhängen kann wieder ein Wichtungsbild, diesmal für den Positionsindex, erzeugt werden (Bild 16). Denn für jedes Pixel wird der Winkelkoeffizient k_g (Gleichung 12) und mit T/R und H/R der Positionsindex aus der Tabelle nach Guth bestimmt.

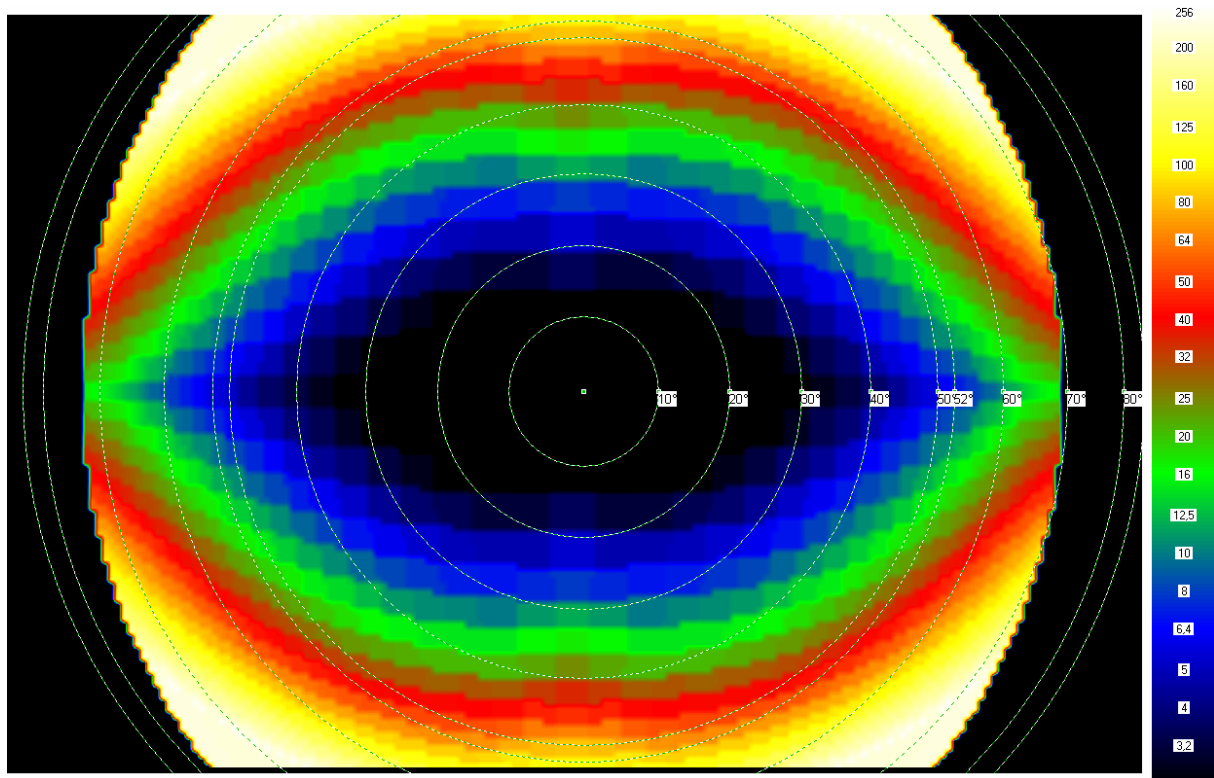
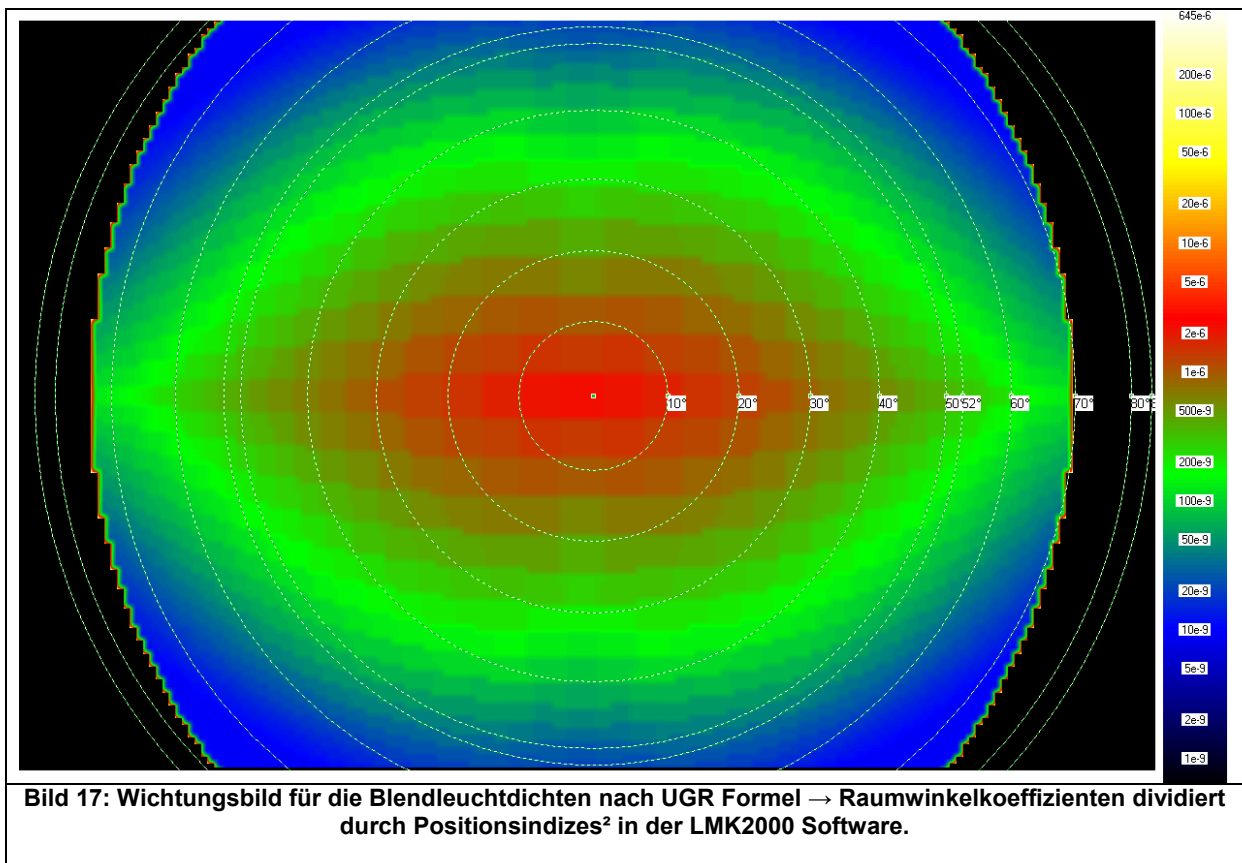


Bild 16: Positionsindizes² nach Guth in einem Wichtungsbild in der LMK2000 Software. Halber horizontaler Bildfeldwinkel 72° und halber vertikaler Bildfeldwinkel 52°

Aus den beiden Wichtungsbildern kann natürlich ein neues Wichtungsbild (Raumwinkelinkrement / Positionsindex²) erzeugt werden, welches dann in der LMK2000-Software abgelegt wird und zur Berechnung der UGR-Parameter zur Verfügung steht.



3.5.4 Berechnung des UGR Wertes mit der LMK2000 Software

Zur Berechnung des UGR Wertes einer Leuchte sind zwei photometrische Messgrößen notwendig. Zum Einen die mittlere Leuchtdichte der Lichtquelle selbst und zum Anderen die mittlere Umfeldleuchtdichte. Beide Messgrößen können relativ einfach aus dem Messdatensatz einer Leuchtdichtemesskamera gewonnen werden.

Die Umfeldleuchtdichte L_U wird durch Mittelung über das gesamte Messbild bestimmt. Die Definition, Abgrenzung und Erfassung der Leuchtdichte von Blendlichtquellen L_i kann automatisch über Leuchtdichteschwellwerte erfolgen, siehe Bild 18.

Die Leuchtdichten der Blendquellen gehen quadratisch in die Formel zur Berechnung des UGR Wertes ein. Zu dem werden sie noch mit einem Faktor multipliziert. Dieser Faktor ergibt sich aus dem Raumwinkel der Lichtquelle dividiert durch das Quadrat des Positionsindizes, siehe Gleichung 10. Diese Berechnung kann ebenfalls in der LMK2000 Software durchgeführt werden.

Diese Operationen stehen in der LMK2000-Software zur Verfügung.

Nach der Multiplikation des quadrierten Messbildes mit dem Faktor 'UGR Wichtung' müssen in dem daraus resultierenden Auswertebild die Blendlichtquellen mit einem Schwellwertobjekt vom Hintergrund separiert werden. Mit Hilfe der Funktionalität der Zeilenformel in der LMK 2000 Software wird dann das Ergebnis über die gesamte Anzahl aller zur Blendlichtquelle zählenden Pixel summiert bzw. integriert. Die in diesem Abschnitt erläuterten mathematischen Schritte sind in Bild 19 zusammenfassend dargestellt.

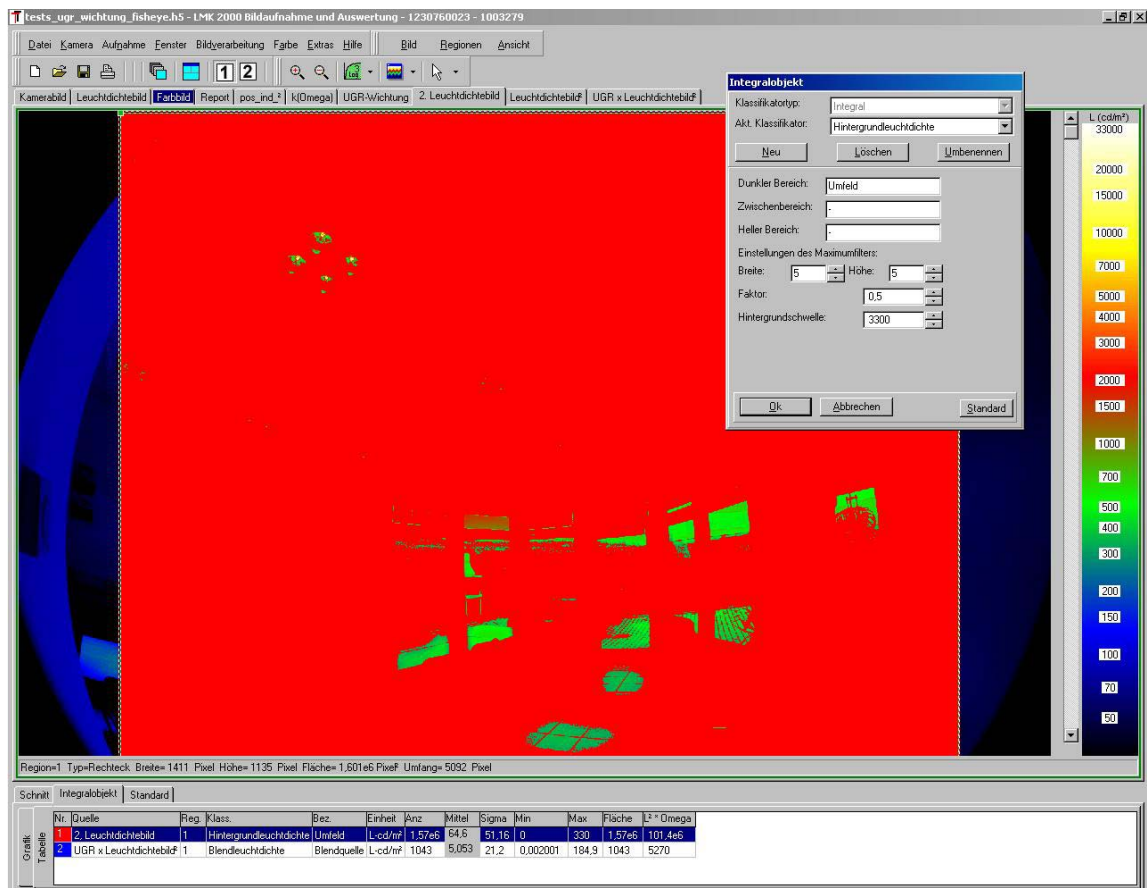


Bild 18: Bestimmung der mittleren Umfeldleuchtdichte (rot markierte Pixel) mit Hilfe eines oberen Leuchtdichtegrenzwerthes (im Bild entsprechend 10% der max. Leuchtdichte → 3300 cd/m²)

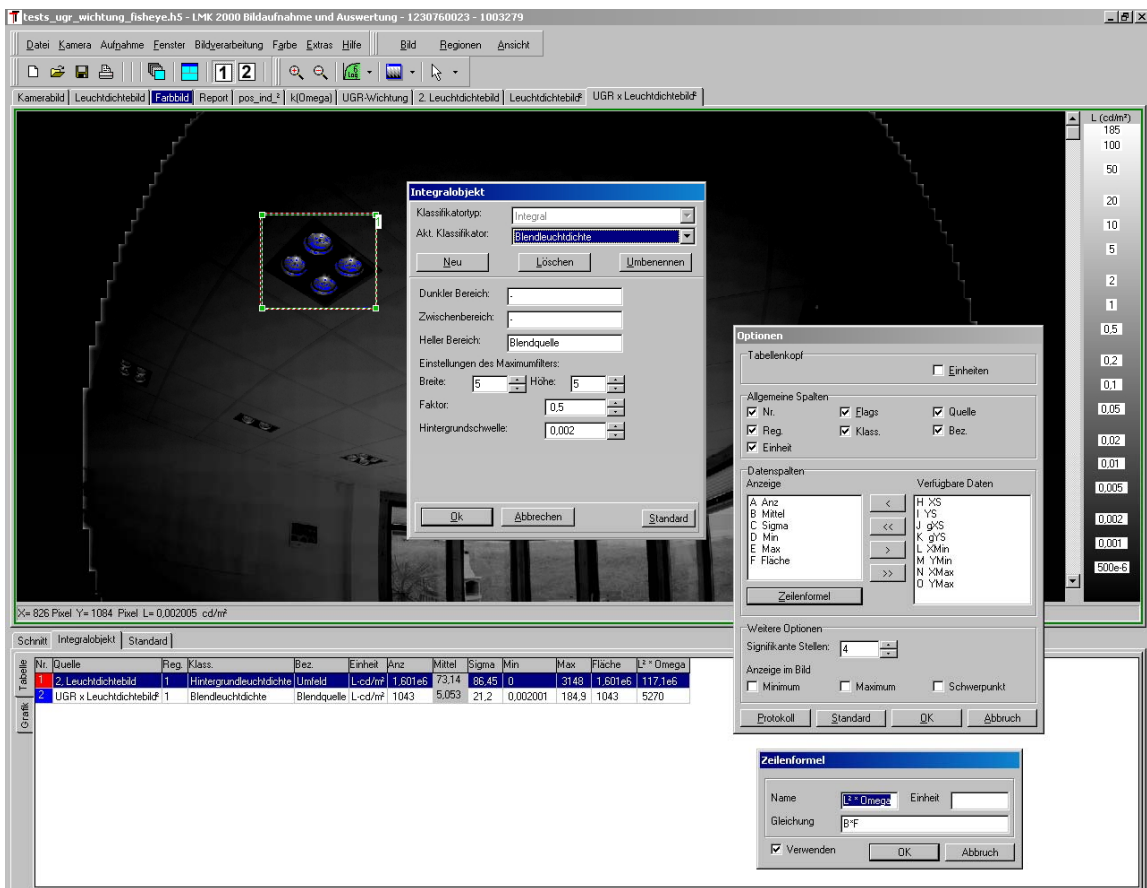


Bild 19: Abbildung der LMK2000 Software mit abschließenden Auswertungsschritten

In Bild 19 ist im unteren Bildbereich eine Tabelle mit den Messdaten für das Schwellwertobjekt geöffnet. In der ersten Zeile der Tabelle wird in der Spalte 'Mittel' der Mittelwert der Hintergrundleuchtdichte angezeigt, siehe dazu das Schwellwertobjekt aus Bild 17.

In der zweiten Zeile wird in der letzten Spalte 'L² * Omega' das Ergebnis der Zeilenformel angezeigt. Mit diesen Daten kann nun nach Gleichung 10 der UGR Wert für diese Lichtquelle bestimmt werden.

Nr.	Quelle	Bez.	Einheit	Mittel	Fläche	L ² * Omega
1	2, Leuchtdichtebild	Umfeld	L-cd/m ²	73,14	1,60E+06	1,17E+08
2	UGR x Leuchtdichtebild ²	Blendquelle	L-cd/m ²	5,053	1043	5270

$$UGR = 8 * \log((0,25/73,14) * 5270)$$

$$UGR = 10,04$$

Durch die Wahl der aufgespannten Regionen zur Separierung der Blendquellen über eine Schwellwertoperation (Günstig Integralobjekt) können sowohl UGR-Werte für einzelne Quellen, als auch für eine komplette Anlage bestimmt werden.

3.6 Literatur

- [1] Hentschel, H.-J.: Licht und Beleuchtung, Theorie und Praxis der Lichttechnik; Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 5. Auflage 2002
- [2] Schreuder, D. A.; Straßenbeleuchtung für Sicherheit und Verkehr; Shaker Verlag Aachen 2001
- [3] Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations; Publication CIE 150:2003; ISBN 3 901 906 19 3
- [4] Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen, LiTG-Publ. Nr. 12 (1996), e. V. Berlin ISBN 3-927787-14-0
- [5] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) vom 15. März 1974 (BGBl. I, S. 721, 1193) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I, S. 880), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 19. Oktober 1998 (BGBl. I, S. 3178)
- [6] Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen; Beschluss des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) vom 10. Mai 2000
- [7] Leitlinie des Ministeriums für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen (Licht-Leitlinie), Amtsblatt für Brandenburg Nr.7 vom 14.02.2001
- [8] Krüger, U.; Schmidt, F. "Applied image resolved light- and color measurement – introduction and application examples" Progress in Automobile Lighting. Darmstadt University of Technology, 23.9.-24.9.2003, PAL 2003, pp. 567-577
- [9] Schmidt, F.; Krüger, U. „Ortsaufgelöste Leuchtdichte- und Farbmessung mit CCD-Kameras“ CCD-Forum München 2003
- [10] Schmidt, F.; Krüger, U.; Wolf, St. „Applikationen der ortsaufgelösten Licht- und Farbmessung“ Licht 2004, Dortmund 19.9.-22.9.2004
- [11] Krüger, U. „Ausgewählte Aspekte der ortsaufgelösten Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen“ Dissertation TU Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2004
- [12] Krüger, U.; Schmidt, F.; Wolf, St. „Applications of image resolved light and colour measurement“ Light & Engineering 3/2005, Znack Publishing House Moscow
- [13] 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
- [14] 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