

## TI-MESSUNG MITTELS LEUCHTDICHTEMESSKAMERA (ILMD) IN DER STRASSENBELEUCHTUNG

Porsch, T.<sup>1</sup>, Walkling, A.<sup>2</sup>, Ueberschaer, A.<sup>2</sup>, Schmidt, F.<sup>1</sup>, Schierz, C.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Werner-von-Siemens-Straße 5, 98693 Ilmenau, Deutschland

<sup>2</sup>) Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, Prof.-Schmidt-Straße 26, 98693 Ilmenau, Deutschland

[tobias.porsch@technoteam.de](mailto:tobias.porsch@technoteam.de)

### ABSTRACT

Bildgebende Leuchtdichtemesskameras (*ILMD*, *Imaging luminance measuring device* [1]) werden in vielen verschiedenen Anwendungen genutzt.

Mit der Nutzung eines ILMDs ist die Auswertung von Leuchtdichten „wie gesehen“ im Messbild (ILMD Typ I) möglich. Zudem werden nicht nur die Leuchtdichteinformation und ihre Zusammenhänge, sondern auch Informationen bezüglich deren Positionen und Größe im Messfeld bereits gestellt (ILMD Typ II). Damit kann die physiologische Blendung durch Straßenbeleuchtungsanlagen anhand orts aufgelöster Leuchtdichtebilder gemessen werden.

Dieser Beitrag stellt hierzu ein neu entwickeltes Softwaretool vor, mit dem eine TI-Messung erstmalig intuitiv und in wenigen Schritten erfolgen kann.

Für die Validierung der Software wurden Vergleichsmessungen zwischen den Messergebnissen verschiedener Messeinrichtungen im Labor und im Feld durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Messanordnung zur Bestimmung der physiologischen Blendung (operationalisiert durch die Schwellenwerterhöhung TI) in der Praxis leistungsfähig ist.

Schlagwörter: Leuchtdichtemesskamera, ILMD, Leuchtdichtebild, DIN-Messraster, physiologische Blendung, Schleierleuchtdichte, prozentuale Schwellenwerterhöhung TI

## 1 MOTIVATION

Bildgebende Leuchtdichtemesskameras (*ILMD*, *Imaging luminance measuring device* [1]) werden in vielen verschiedenen Anwendungen genutzt. Mit der Nutzung eines ILMDs ist die Auswertung von Leuchtdichten „wie gesehen“ im Messbild (ILMD Typ I) möglich. Zu dem werden nicht nur die Leuchtdichteinformation und ihre Zusammenhänge, sondern auch Informationen bezüglich deren Positionen und Größe im Messfeld bereitgestellt (ILMD Typ II). Unter Verwendung des ILMD Typ II lassen sich alle für die physiologische Blendung benötigten Größen messtechnisch bestimmen, aus denen im Folgenden die Schwellenwerterhöhung unmittelbar berechnet werden kann. Aufgrund seiner einfachen Anwendbarkeit in der Praxis ist das neue Messverfahren insbesondere für die Blendungsbewertung von Straßenbeleuchtungsanlagen von Interesse.

## 2 VORSTELLUNG DES PROJEKTES „CoLight“

Im Rahmen des Projektes „CoLight“<sup>1</sup> an der TU Ilmenau wurde eine Feldstudie zur Objektdetektion durchgeführt. Ziel dieser Studie war es, den Einfluss von Lichtverteilung und Lichtfarbe einer Straßenbeleuchtungsanlage auf die Sehleistung unter normalen (trockene Straße) und erschwerten (nasse Straße) Sehbedingungen zu untersuchen. Die unmittelbare Messung der Schwellenwerterhöhung mit ILMD wurde als Möglichkeit des Vergleiches zwischen gemessenen und simulierten Werten nach CIE und EN Vorschriften [6] genutzt. Dabei wurde die TI-Messung zur objektiven Bewertung der Sehleistung herangezogen. Die Ergebnisse wurden mit Aussagen von Testpersonen verglichen.

Aus diesen Anforderungen heraus begannen die Autoren dieses Beitrages mit dem Entwurf und der Umsetzung eines flexiblen aber einfach zu bedienenden Softwarewerkzeugs, das der Erfassung der notwendigen Messgrößen dient.

## 3 DER TI-WERT VON STRASSENBELEUCHTUNGSANLAGEN

Die durch physiologische Blendung verursachte prozentuale Erhöhung der Wahrnehmungsschwelle wird in der Straßenbeleuchtung mit dem sogenannten TI-Wert angegeben. Dieser wird auf Grundlage der äquivalenten Schleierleuchtdichte  $L_{veil}$  und der mittleren Fahrbahnleuchtdichte  $L_{road}$  [4] berechnet.

Diese Beschreibungsform der physiologischen Blendung bildet modellhaft das im menschlichen Auge auftretende Streulicht ab. Das Streulicht entsteht durch Wechselwirkung des einfallenden Lichtes mit dem Augenmedium und führt auf der Netzhaut zu einer Verschleierung und damit zu einer Kontrastreduzierung. Aufgrund dieser Eigenschaft wird das Streulicht mittels der äquivalenten Schleierleuchtdichte beschrieben. Sie ist hauptsächlich eine Funktion der vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge und der Beobachterposition relativ zur Blendungsquelle [3]. Deshalb ist die Blickrichtung ein weiterer wichtiger Parameter für die Blendungsanalyse von Leuchtdichtebildern (ILMD Typ II).

---

<sup>1</sup> Das Projekt „CoLight“ ist ein thüringisches Verbundprojekt, welches durch europäische Forschungs- und Fördergelder sowie durch die Thüringer Aufbaubank (TAB) unterstützt wurde.

#### 4 VORTEILE EINES ILMD UND DIE PRAKTISCHE ANWENDUNG

- individuelles perspektivisches Messfeld zur Anpassung an ein Messraster
- Möglichkeit der Veränderung der Beobachterblickrichtung
- unterschiedliche automatisierte und manuelle Blendlichtquellenbestimmung
- vereinfachter Vergleich von Parametern und Blendungsformeln [2, 3]

Mit Verwendung der neuen Software ist es einfach möglich, die Beobachterblickrichtung und somit den Blendwinkel innerhalb des aufgenommenen Messbildes zu verändern. Um dies zu tun, muss lediglich ein Fadenkreuz auf die gewünschte Position im Messbild bewegt werden (siehe Abschnitt 4.2.1).

Im nächsten Schritt wird die mittlere Fahrbahnleuchtdichte bestimmt und fortan als Adaptationsleuchtdichte für die weiteren Berechnungsschritte verwendet. Die Position des Leuchtdichtemessrasters auf der Fahrbahn wird halbautomatisch anhand eines Messfeldes in dem perspektivischen Messbild bestimmt. Dafür müssen die in Absatz 4.1 genannten Voraussetzungen erfüllt sein. Das hierfür verwendete Leuchtdichtebild kann dasselbe wie für die Vermessung der Blendlichtquellen oder ein zweites sein (siehe Abschnitt 4.2.2).

Wenn die Schleierleuchtdichten und die Fahrbahnleuchtdichten berechnet sind, zeigt das Programm den TI-Wert als Gesamt- und Einzelwert (für jede Leuchte) wie im ersten Schritt definiert an (siehe Abbildung 1).

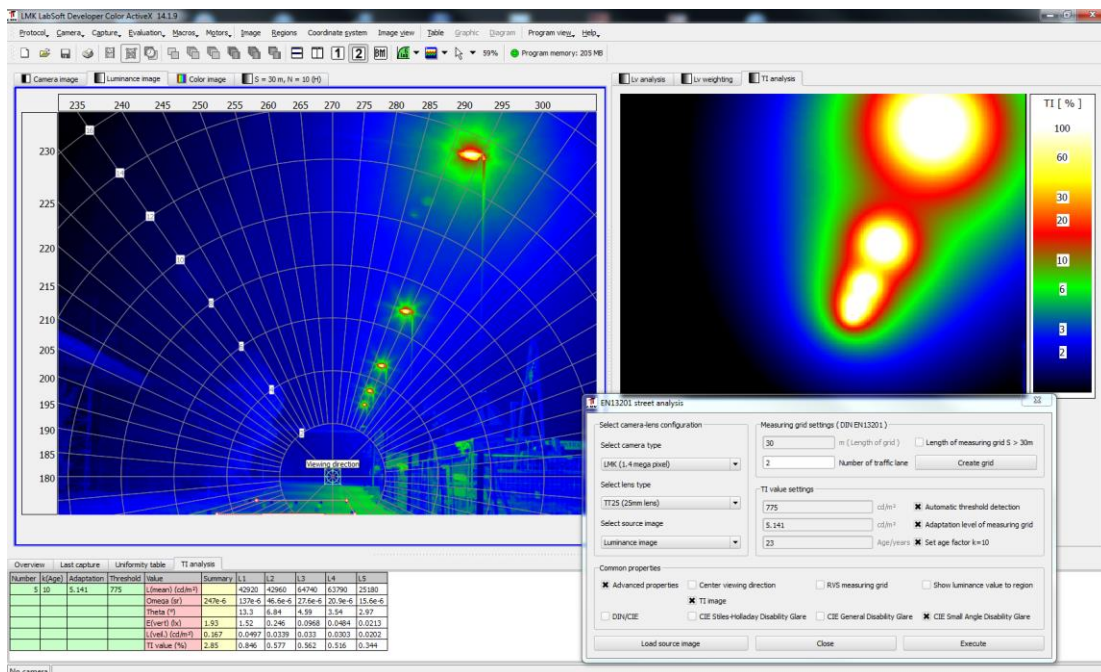


Abbildung 1 – Leuchtdichtebild einer Straßenbeleuchtungsanlage und Darstellung des Ergebnisses der Blendwertbestimmung (TI-Wert)

## 5 FESTLEGUNG EINES ILMD SETUP UND AUSWERTUNG NACH DIN EN 13201

### 5.1 KONFIGURATION DES ILMD FÜR DIE PHOTOMETRIE NACH DIN EN 13201-4:2003

Die Bestimmung und Berechnung der geforderten photometrischen Messgrößen erfolgen nach den Spezifikationen der DIN EN 13201-3.

So muss entsprechend der DIN EN 13201-4 der Leuchtdichtemesser einen minimalen Messfeldwinkel von  $0,03^\circ$  in der vertikalen und  $0,3^\circ$  in der horizontalen Ebene vorweisen können. Wenn ein ILMD die Bestimmung der Leuchtdichten für jeden Messrasterpunkt durch Mittelung über angrenzende Pixel vollzieht, so dürfen die begrenzenden Winkel mit der Summe der Winkelinkremente der betreffenden Pixel nicht überschritten werden [2].

Des Weiteren soll die vertikale Beleuchtungsstärke als Summe der Anteile der Blendlichtquellen in einer Ebene senkrecht zur Blickrichtung und auf einer Höhe des Beobachterauges (1,5 m über Boden) gemessen werden. Jede sichtbare Blendlichtquelle mit einer Beobachtungsebene von über  $20^\circ$  zur Horizontalen soll von der Messung ausgeschlossen werden [1].

Wird ein ILMD mit einer Messauflösung von 1400 x 1000 Pixel verwendet, dann werden die für die verschiedenen Abbildungssysteme in Tabelle 1 angegebenen Werte eingestellt.

**Tabelle 1 – Mögliche Messauflösungen (1400 x 1000 Bildempfängerauflösung)**

| Objektivbrennweite | Messfeldwinkel des Leuchtdichtebildes | Mittlerer Messfeldwinkel pro Pixel | Mittlerer Messfeldwinkel 3(H) x 3(V) Pixel | Messung der mittleren Fahrbahnleuchtdichte | Messung der vertikalen Beleuchtungsstärke |
|--------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|--|---|
| 8 mm               | 63°(H) x 45°(V)                       | 0,0452°/px                         | 0,1356°                                    | -  | x   |
| 12 mm              | 43°(H) x 31°(V)                       | 0,0313°/px                         | 0,0939°                                    | -  | x   |
| 16 mm              | 32°(H) x 23°(V)                       | 0,0232°/px                         | 0,0696°                                    | ?  | ?   |
| 25 mm              | 20°(H) x 14°(V)                       | 0,0148°/px                         | 0,0444°                                    | ?  | ?   |
| 50 mm              | 10°(H) x 7,4°(V)                      | 0,0074°/px                         | 0,0222°                                    | x  | -   |

Anm.: Die Fragezeichen markieren mögliche Konfigurationen die näher untersucht werden sollten. Beispielsweise ist es möglich den Messfeldwinkel des 25 mm Objektivs über 10(H) x 2(V) zusammenhängende Pixel zu mitteln, um somit dem Standard zu genügen. Des Weiteren kann durch eine geschickte Ausrichtung des ILMD und die virtuelle Platzierung der Beobachterblickrichtung im Messbild, die Bestimmung der vertikalen Beleuchtungsstärke mit einem 16 mm oder 25 mm Objektiv ausprobiert werden.

Die Unsicherheit der Messwerte ist abhängig von den Eigenschaften des ILMD und der Objektivkombination und muss mit den Messergebnissen genannt werden.

ILMDs mit einer zu geringen Messwinkelauflösung dürfen auf näherer Distanz und einer proportional geringeren Höhe verwendet werden. Die optische Achse des Messgerätes

soll bei  $(89 \pm 0,5)^\circ$  zur Fahrbahnflächennormalen ausgerichtet sein. Diese Bedingung wird mit der Positionierung des Fadenkreuzes im Messbild erfüllt. Ein Messfeld auf der Fahrbahn darf nicht größer sein als 0,5 m in Quer- und 2,5 m in Längsrichtung.

## 5.2 MESSUNG UND BERECHNUNG DER MITTLEREN STRASSENLEUCHTDICHTE

Die mittlere Fahrbahnleuchtdichte  $L_{adapt}$  (Fahrbahn) kann entweder aus demselben Messbild wie die äquivalente Schleierleuchtdichte oder aus einem anderen Leuchtdichtemessbild abgeleitet werden.

Die Zuordnung der standardisierten Ausrichtung der Messfelder mit der pixelweisen und perspektivischen Anordnung der Leuchtdichten im Messbild wird über die Software vorgenommen. Dazu werden bei Bedarf zusätzliche Informationen zur tatsächlichen Länge des Fahrbahnmessfeldes und die Anzahl der Fahrspuren benötigt. Damit kann das perspektivische Messbild projektiv entzerrt werden. Das Ergebnisbild beinhaltet dann das standardmäßige Fahrbahnmessraster für die Leuchtdichte auf der Fahrbahnoberfläche (siehe Abbildung 2).

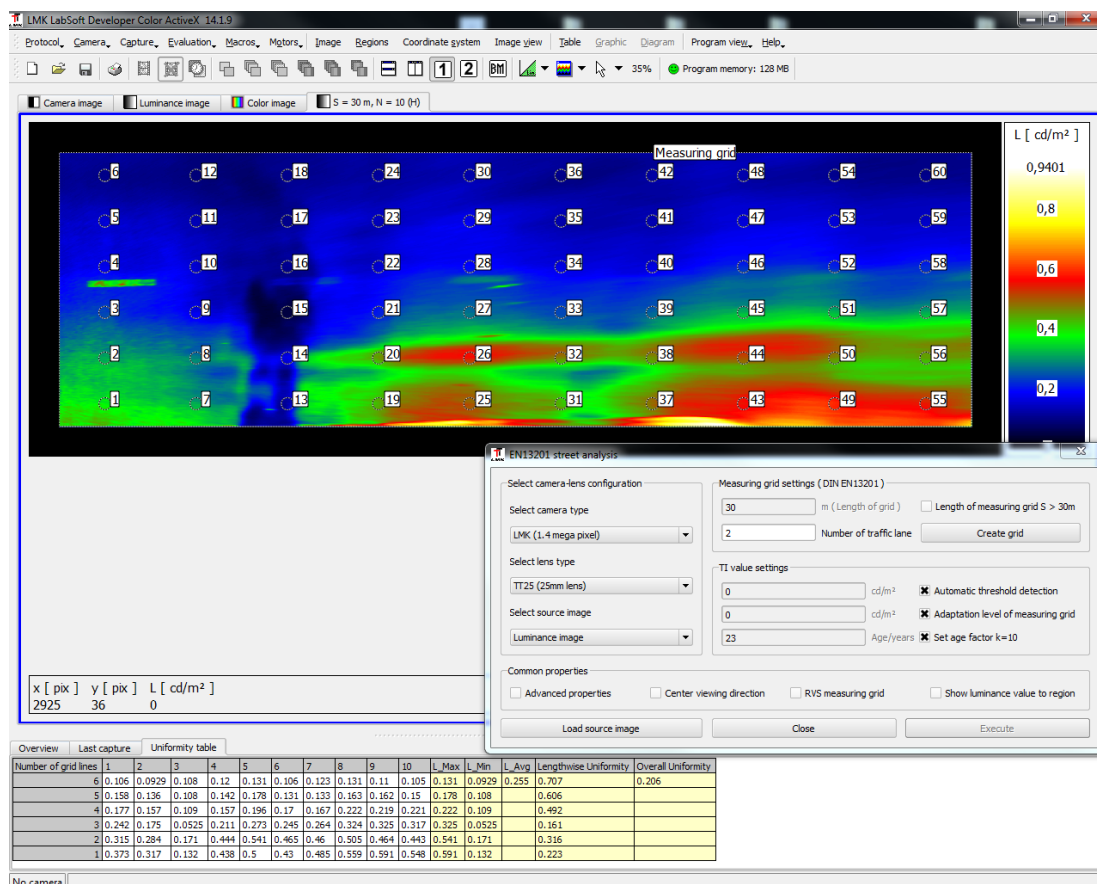


Abbildung 2 – Orthografische Abbildung der Fahrbahnleuchtdichten nach dem Schritt der projektiven Entzerrung

### 5.3 ASPEKTE BEI DER PROGRAMMIERUNG DER TI-WERT BERECHNUNG MIT HINBLICK AUF DIE DIN EN 13201-3:2003

Die CIE Stiles-Holladay Gleichung wird verwendet um die äquivalente Schleierleuchtdichte zu beschreiben [5]:

$$L_{veil.} = k \cdot \frac{E_{vert.(source)}}{\vartheta_{source}^2} \quad (1)$$

wobei:

|                      |  |
|----------------------|--|
| $L_{veil}$           | äquivalente Schleierleuchtdichte (cd/m <sup>2</sup> );         |
| $E_{vert}$           | vertikale Beleuchtungsstärke am Auge (lx);                     |
| $\vartheta_{source}$ | Blendwinkel (Grad);  |
| $k$                  | Alter des Beobachters, entspricht der Konstante von 10 [1, 3]. |

Bei der Verwendung eines ILMD kann aus den Leuchtdichtewerten der Blendlichtquelle  $L_{source}$  und dem ermittelten Blendwinkel  $\vartheta_{source}$  die vertikale Beleuchtungsstärke  $E_{vert}$  für jede einzelne Leuchte ausgerechnet werden.

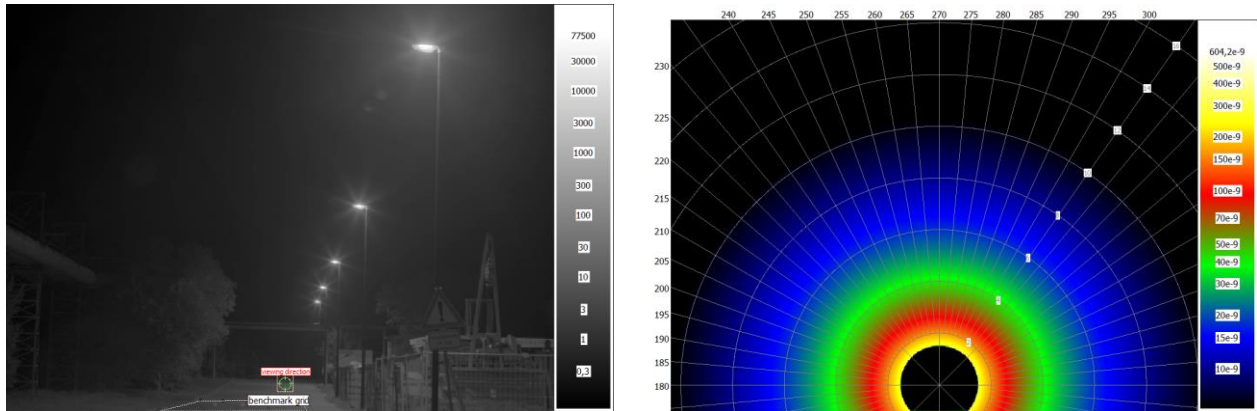
Die Umsetzung von Gleichung (2) in der Bildverarbeitung führt zu einem Wichtungsbild. Innerhalb des tatsächlichen Bildfeldes des ILMD (vgl. Messfeldwinkel des Bildes) ist es möglich die zugeordnete Blickrichtung (siehe Abbildung 3) zu verändern. Der Softwarealgorithmus berechnet sofort ein neues Wichtungsbild (siehe Abbildung 4).

$$E_{vert} = \sum_{i,j} L_{(i,j)} \cdot \Delta\Omega_{(i,j)} \cdot \cos \vartheta_{(i,j)} \quad , \text{for } \forall(i,j) \in source \quad (2)$$

wobei:

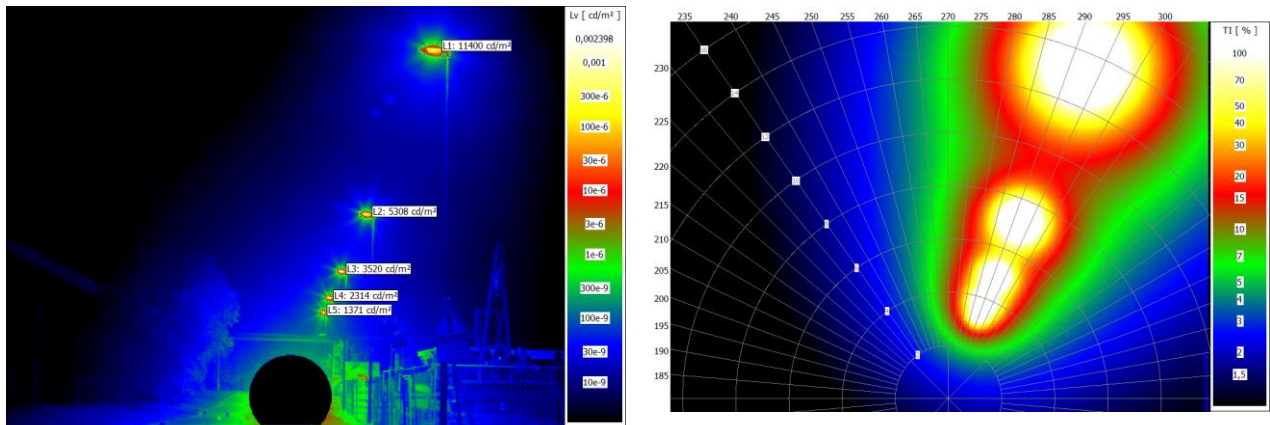
|                      |  |
|----------------------|--|
| $E_{vert}$           | vertikale Beleuchtungsstärke am Auge (lx);   |
| $L_{(i,j)}$          | der pixelweise Leuchtdichte mit einem Anteil an der Blendlichtquelle (cd/m <sup>2</sup> ); |
| $\Omega_{(i,j)}$     | das pixelweise Raumwinkelinkrement der Blendlichtquelle (sr);                              |
| $\vartheta_{source}$ | Blendwinkel (Grad).  |

Mit der Information der Winkelinkremente für jeden Pixel ist es möglich den Blendwinkel  $\vartheta_{source}$  und den Raumwinkel  $\Omega_{source}$  einer Blendlichtquelle zu berechnen. Dies geschieht unabhängig von der Positionierung der optischen Achse des ILMD. Dadurch kann der Blendwinkel  $\vartheta_{source}$  für verschiedene Blickrichtungen im Quellbild bestimmt werden und es werden Untersuchungen bezüglich einer veränderten Beobachterblickrichtung ermöglicht. Des Weiteren können damit auch weitere Objektivkombinationen (mit kleinerem Messfeldwinkel aber höherer Messwinkelauflösung) genutzt werden.



**Abbildung 3 (linke Seite) – Leuchtdichtebild einer Straßenbeleuchtungsanlage mit neu definierter Beobachterblickrichtung**

**Abbildung 4 (rechte Seite) – Abbildung des formalen Zusammenhanges nach der Stiles-Holladay Gleichung gemäß der Blickrichtungsdefinition aus Abbildung 3**



**Abbildung 5 (linke Seite) – Abbildung der äquivalente Schleierleuchtdichten  $L_{veil}$ . (5 x log. Skala) und Mittelwert der Leuchtdichten für die detektierten Blendungsquellen**

**Abbildung 6 (rechte Seite) – Bild einer TI-Wert Verteilung (2 x log. Skala)**

Das Ergebnis aus Gleichung (1) ist ein Produktbild mit der pixelweisen äquivalenten Schleierleuchtdichte  $L_{veil}$ . Um den integralen Wert für  $L_{veil}$  zu erhalten ist es möglich, eine Standardmittelwertstatistik über alle Pixel, klassifiziert als Bestandteil einer Blendlichtquelle, zu verwenden (siehe Abbildung 5).

In einem abschließenden Schritt formen die gemessenen Parameter die Gleichung (3) zur Berechnung der Erhöhung der Wahrnehmungsschwelle in Blickrichtung durch die physiologische Blendung bei ortsfester Straßenbeleuchtung:

$$TI = \frac{65}{(L_{ave(road)})^{0,8}} \cdot L_{veil}. \quad (3)$$

wobei:

|                 |  |
|-----------------|--|
| $TI$            | Schwellenwerterhöhung (%);                                   |
| $L_{veil}$      | äquivalente Schleierleuchtdichte ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ); |
| $L_{ave(road)}$ | mittlere Fahrbahnleuchtdichte ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ).    |

Das Resultat aus Gleichung (3) ist der TI-Wert für die vollständige Messszene, der sich aus allen darin enthaltenen Blendlichtquellen ergibt. Die Anteile der einzelnen Blendlichtquellen werden als Einzelanteile angegeben. Es ist zudem möglich diese Operation auch in einem pixelweisen Algorithmus für das gesamte Bild anzuwenden. In diesem Fall repräsentiert jeder Pixel eine eigene Blickrichtung und den dafür errechneten TI-Wert der gesamten Messszene (siehe Abbildung 6). Diese Art der Darstellung ist in der Lage, den TI-Wert für beliebige Blickrichtung darzustellen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Es konnte gezeigt werden, dass ILMDs eine effiziente Messmethode zur Messung des TI-Wertes und anderer berechneter Blendkennzahlen bereitstellen. Aufgrund einfacher Bildverarbeitungsmethoden gibt es nur wenige Einschränkungen zur Einbindung von komplexen physiologischen Zusammenhängen in synthetische Bilder.

Die neue In-Situ-Messung des TI-Wertes bietet neue Möglichkeiten, beispielsweise für die Entwicklung blendungsminimierter Leuchten. Des Weiteren kann sie bei der korrekten Installation von blendungsarmen oder adaptiven Beleuchtungsanlagen nach den relevanten CIE und EN Vorschriften [6] behilflich sein.

## 7 REFERENZEN

- [1] CEN (Comité Européen de Normalisation), (2004), *Calculation of performance. German version.*, DIN EN 13201-3:2004, Berlin, Deutschland, DIN
- [2] CEN (Comité Européen de Normalisation), (2004), *Methods of measuring lighting performance. German version.*, DIN EN 13201-4:2004, Berlin, Deutschland, DIN
- [3] CIE (Commission internationale de l'éclairage), (2002), *CIE equations for disability glare*, No. CIE 146:2002, Wien, Österreich, TC 1-50 report
- [4] CIE (Commission internationale de l'éclairage), (2013), *Characterization of Imaging Luminance Measurement Devices (ILMD)*, Wien, Österreich, TC 2-59 draft
- [5] Narisada, K., Schreuder, D., (2004), *Light Pollution Handbook*, ASSL Band 322, Dordrecht, Niederlande, Springer
- [6] Walkling, A., Schierz, C., (2014), Ist es zweckmäßig, eine zusätzliche Lichtstärkeverteilung für nasse Straßen einzuführen?, LiTG-Tagung "Straßen- und Außenbeleuchtung", 29. und 30.1.2014 Weimar, Deutschland