

## Messung winkelaufgelöster Leuchtdichtekoeffizienten von Straßenoberflächen für kleine Anstrahlwinkel

Susanne Köhler  
(Stipendiatin der Dr. Arnold Hueck Stiftung)  
Matthias Tophinke  
L-LAB  
Salzkottener Straße 1  
33106 Paderborn  
susanne.koehler@l-lab.de  
Tel.: 05251 70434363  
Fax: 05251 70434961

### Kurzfassung

Kfz-Scheinwerfer werden zur Zeit häufig anhand von Lichtstärkeverteilungsdaten und daraus berechneten Beleuchtungsstärken bewertet. Das bedeutet, dass nur das aus den Scheinwerfern abgestrahlte Licht zur Bestimmung von Scheinwerfergütemerkmalen berücksichtigt wird. Um das vom Fahrer wahrgenommene Licht in Form der Leuchtdichte beurteilen zu können, muss man zusätzlich die winkelabhängigen Reflexionseigenschaften der Fahrbahndeckschicht einbeziehen. Zur Beschreibung dieser Reflexionseigenschaften eignet sich der Leuchtdichtekoeffizient, da er einen direkten Zusammenhang zwischen vom Fahrer wahrgenommener Leuchtdichte und vom Scheinwerfer erzeugter Beleuchtungsstärke herstellt. Die messtechnische Schwierigkeit liegt in den sehr kleinen Anstrahlwinkeln. Mit welcher Winkelgenauigkeit der Leuchtdichtekoeffizient von Straßendeckschichten unter den relevanten Lichteinfallswinkeln momentan reproduzierbar zu messen ist, soll der folgende Beitrag beschreiben.

Zunächst wird ein möglicher Messaufbau erläutert, mit dem der Leuchtdichtekoeffizient winkelaufgelöst bestimmt wird. Die Messungen werden zunächst aufgrund der hohen Reproduzierbarkeit der Ergebnisse im Lichtkanal der Hella KGaA Hueck & Co. durchgeführt. Das ermittelte Reflexionsverhalten soll dazu verwendet werden, um aus den berechneten Beleuchtungsstärken auf der Straßenoberfläche Leuchtdichtebilder aus Perspektive des Fahrers zu generieren.

### Theoretischer Hintergrund

Der Leuchtdichtekoeffizient beschreibt die Leuchtdichte, die ein Beobachter von einem Flächenelement wahrnehmen kann, bezogen auf die Beleuchtungsstärke, die auf dasselbe Flächenelement trifft:

Gleichung 1 
$$q = \frac{L}{E}$$

Demzufolge hat der Leuchtdichtekoeffizient die Einheit  $\text{cd}/(\text{lx m}^2)$ .

Im Anwendungsbereich für ortsfeste Straßenbeleuchtung werden Straßenoberflächen durch einen mittleren Leuchtdichtekoeffizienten für die gesamte Straßenoberfläche gekennzeichnet. Dieser mittlere Leuchtdichtekoeffizient beschreibt, soweit er unter gleichen Bedingungen gemessen wurde, die Helligkeit von Straßendeckschichten relativ zueinander recht gut. Ein solcher globaler Leuchtdichtekoeffizient setzt jedoch diffuse Reflexions-

eigenschaften voraus, in denen die wahrgenommene Leuchtdichte unabhängig von Einstrahl- und Beobachtungsgeometrie ist und sich direkt aus dem Reflexionsgrad  $\rho$  berechnen lässt:

Gleichung 2 
$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi \cdot \Omega_0}$$

Da das Reflexionsverhalten von Straßendeckschichten jedoch nicht annähernd diffus ist, wird versucht, dem durch sogenannte Spiegelfaktoren Rechnung zu tragen. Sie beschreiben den gerichteten Anteil der Reflexionseigenschaften von Straßendeckschichten. Der diffuse Reflexionsanteil von Straßendeckschichten hängt maßgeblich von der Farbe ab, der gerichtete Anteil wird im Wesentlichen von der Oberflächenbeschaffenheit bestimmt.

Zur grundlegenden Kennzeichnung von Fahrbahndeckschichten sind diese Kennzahlen sicher geeignet. Da jedoch nur der Leuchtdichtekoeffizient einen direkten Zusammenhang zwischen auftretender Beleuchtungsstärke und resultierender Leuchtdichte herstellt, ist für diesen Anwendungsbereich ein globaler Leuchtdichtekoeffizient vermutlich unzureichend. Des Weiteren gibt es Standards zur Klassifizierung von Fahrbahnoberflächen momentan hauptsächlich für den Anwendungsbereich Straßenbeleuchtung.

Bei Beleuchtung durch Kfz-Scheinwerfer liegt jedoch eine Einstrahl- und Beobachtungsgeometrie vor, die deutlich von der in der Straßenbeleuchtung abweicht. Außerdem verwendet man meist eine Abwandlung des Leuchtdichtekoeffizienten, die Rückwärtsreflexion. Der Unterschied besteht darin, dass man statt der horizontal auf die Fahrbahn treffenden Beleuchtungsstärke die senkrecht zur Lichteinfallrichtung auftretende Beleuchtungsstärke verwendet:

Gleichung 3 
$$q = \frac{L}{E_{\perp}}$$

Für den Fall Beleuchtung durch Kfz-Scheinwerfer sind weit weniger Daten erfasst als für ortsfeste Beleuchtung. Eine umfangreiche Datenerfassung eines globalen Leuchtdichtekoeffizienten stellt Tabelle 1 dar. Hier wurden Straßen nach Anwendungsbereich gruppiert und ihr Leuchtdichtekoeffizient circa 15 m vor dem Fahrzeug bestimmt. Diese Werte verdeutlichen, wie sehr die vom Fahrer wahrgenommene Leuchtdichte von der Fahrbahn selbst abhängt. Unterscheidet sich der Leuchtdichtekoeffizient zwischen verschiedenen Fahrbahndeckschichten um den Faktor vier, was laut Tabelle 1 kein unwahrscheinlicher Fall ist, unterscheidet sich die resultierende Leuchtdichte bei gleichem Scheinwerfer um den gleichen Faktor. Das bedeutet, dass anhand einer reinen Scheinwerferlichtverteilung ohne Berücksichtigung der Fahrbahndeckschicht, die für den Fahrer sicherheitsrelevanten Sichtbedingungen, wie beispielsweise Adaptationsleuchtdichte oder Kontraste zu Sehobjekten, nicht abgeleitet werden können.

Tabelle 1: Leuchtdichtekoeffizienten typischer deutscher Fahrbahnoberflächen [1, S. 26]

	5%-Quantil	Median	95%-Quantil
Autobahn	3,1	6,65	12,8
Bundesstraßen	2,6	6,1	11,0
Landstraßen	3,75	7,85	14,5

Ein weiteres Problem ist, dass sich der Leuchtdichtekoeffizient auch für die gleiche Fahrbahndeckschicht sehr stark unterscheiden kann. Der Leuchtdichtekoeffizient ist nicht nur abhängig vom Material selbst sondern zusätzlich sowohl von der Einstrahlgeometrie (Index i) als auch von der Beobachtungsgeometrie (Index o). Diese beiden Geometrien werden charakterisiert durch die Richtung des Raumwinkels  $\Omega_i$ , in den eingestrahlt wird und des Raumwinkels  $\Omega_o$ , aus dem beobachtet wird. Jede Richtung kann mit Hilfe eines horizontalen Winkels ( $\psi$ ) und eines vertikalen Winkels ( $\varphi$ ) beschrieben werden.

Gleichung 4

$$q = \frac{L(\Omega_o)}{E(\Omega_i)} = \frac{L(\varphi_o, \vartheta_o)}{E(\varphi_i, \vartheta_i)}$$

Für reale Straßen kann der Leuchtdichtekoeffizient für relevante Winkel sich um Faktor fünf für dieselbe Straßenprobe unterscheiden [1, 2].

Würde man die Leuchtdichtekoeffizienten für die Beleuchtung durch Kfz-Scheinwerfer relevanten Winkel ausreichend aufgelöst kennen, könnte man von bekannten Beleuchtungsstärken auf der Straße direkt auf die vom Fahrer wahrgenommene Leuchtdichten schließen. Eine bekannte orts aufgelöste Leuchtdichte der Fahrbahndeckschicht würde es ermöglichen, sowohl auf das Adaptationsniveau des Fahrers als auch auf Kontraste zu einfachen Sehobjekten zu schließen. Mit Hilfe von Schwellenkontrastmodellen könnte folglich die Sichtbarkeit von einfachen Sehobjekten beurteilt werden. Aus diesem Grund ist das Ziel der Autoren das Reflexionsverhalten von Straßendeckschichten für die relevanten Winkelbereiche in ausreichender Auflösung zu bestimmen. Die messtechnische Schwierigkeit liegt in den sehr kleinen Anstrahlwinkeln. Es soll ein Messverfahren für Leuchtdichtekoeffizienten entwickelt und getestet werden, das die notwendigen Winkelkombinationen auf realen Straßendeckschichten herstellt und nicht wie bisherige Verfahren durch entsprechende Verkipfung einer Fahrbahnprobe relativ zur Lichtquelle bzw. zum Leuchtdichtemessgerät. Der grundlegende Messaufbau und erste Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

## Messaufbau

Die wesentliche Idee der hier beschriebenen Erfassung von Leuchtdichtekoeffizienten liegt darin, nicht auf Fahrbahnproben beschränkt zu sein. Die notwendigen sehr kleinen Einstrahlwinkel sind sehr schwierig in der notwendigen Auflösung reproduzierbar herzustellen. Je weiter die Fahrbahnprobe sich von Lichtquelle und Messgerät entfernt befindet, desto einfacher wird diese Aufgabe. Jedoch resultiert eine große Messentfernung in einer notwendigen größeren Fahrbahnprobe und einer entsprechend höheren Lichtstärke und ist somit begrenzt. Folglich ist die Messung von Leuchtdichtekoeffizienten von Fahrbahnoberflächen anhand von Straßenproben bei hohen Messentfernungen auf schwer reproduzierbare Winkelkombinationen und auf recht grobe Winkelauflösungen begrenzt. Deshalb soll das vorgestellte Verfahren die gesamte Fahrbahnoberfläche bei der Messung in Betracht ziehen. Ein weiterer Vorteil dieses Vorgehens ist, dass Inhomogenitäten der Fahrbahndeckschicht, wie beispielsweise Spurrinnen mit erfasst werden können und für die Winkelkombinationen gemessen werden, in denen sie sich real befinden.

Um das Verfahren auf seine Leistungsfähigkeit zu testen wurden erste Messungen im Lichtkanal der Hella KGaA Hueck & Co. in Lippstadt durchgeführt. Grund hierfür sind die sehr reproduzierbaren Bedingungen. Der Lichtkanal ist eine überdachte Straße von 140 m Länge und 11 m Breite. Demzufolge ist er nach außen hin vollkommen abgedunkelt und es ist nicht wie bei Außenmessungen mit wechselnden Umgebungsbeleuchtungsstärken zu rechnen. Weiterhin dient der Lichtkanal vorrangig zu Visualisierungszwecken und wird nicht als Fahrbahn genutzt. Somit sind Änderungen des Reflexionsverhaltens über die Zeit im Gegensatz zu realen Straßen auszuschließen. Die Straße selbst hat zwei Spuren, die jeweils von einer Außenmarkierung und der Mittelmarkierung begrenzt werden. Jede Spur ist circa 3,70 breit.

Für die ersten Messungen war das Ziel eine Messgeometrie herzustellen, die einerseits einem durchschnittlichen Fahrzeug mit normalem Fahrer entspricht und andererseits möglichst ähnlich zu vorangegangenen Messungen ist. Die Scheinwerfer waren in 0,65 m Höhe montiert und befanden sich direkt vor der Position des Fahrers (Motorradfahrergeometrie), 0,3 m links (linker Fahrzeugscheinwerfer) und 0,9 m rechts (rechter Fahrzeugscheinwerfer) davon. Der Beobachter wurde in 1,2 m Höhe 2 m hinter dem Betrachter angenommen.

Als Lichtquelle wurde ein Halogenscheinwerfer verwendet. Grund hierfür ist, dass das Halogenspektrum am nächsten zu den Kalibrierspektren der meisten Messgeräte liegt. Außerdem wurde eine sehr stabile Stromversorgung realisiert, so dass eine Änderung des Lichtstroms aufgrund von Netzschwankungen nahezu ausgeschlossen werden konnte. Die Lichtverteilung der Lichtquelle ist sehr genau bekannt und so ausgelegt, dass sie sehr reproduzierbar eingestellt werden. Somit kann jedem Punkt auf der Straße eine Beleuchtungsstärke zugeordnet werden. Für diese Punkte wird die Leuchtdichte aus Sicht des Fahrers gemessen. Folglich kann man für die verschiedenen Straßenpositionen bzw. ihre entsprechenden Winkelkombinationen aus Einstrahl- und Beobachtungsgeometrie die entsprechenden Leuchtdichtekoeffizienten ermitteln.

## Erste Ergebnisse

Die Fahrbahndeckschicht des Lichtkanals ist sehr homogen. Das bedeutet in diesem Fall, dass es keine sichtbaren Helligkeitsunterschiede zwischen verschiedenen Teilen der Straßendeckschicht gibt. Während der Messungen wurde zusätzlich zur Leuchtdichte aus Sicht des Betrachters die Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn aufgenommen. Diese wurden daraufhin überprüft, ob sie den aus der Lichtstärkeverteilung berechneten Beleuchtungsstärken entsprechen. Aus dem Vergleich der gemessenen mit der berechneten Beleuchtungsstärke wurde geschlossen, dass der Scheinwerfer ausreichend genau eingestellt werden konnte. Die momentane Winkelauflösung des Verfahrens beträgt  $0,2^\circ$ . Es wird daran gearbeitet, diese weiter zu verfeinern. Der minimale vertikale Winkel, in dem der Leuchtdichtekoeffizient momentan messbar ist beträgt  $0,2^\circ$ . Dies entspricht für die angegebene Geometrie etwa einer Entfernung von 100 m. Das bedeutet, dass die erfassten Messwerte ausreichend sind, um sie auf heutige Abblendlichtscheinwerfer respektive deren Lichtverteilungen anzuwenden.

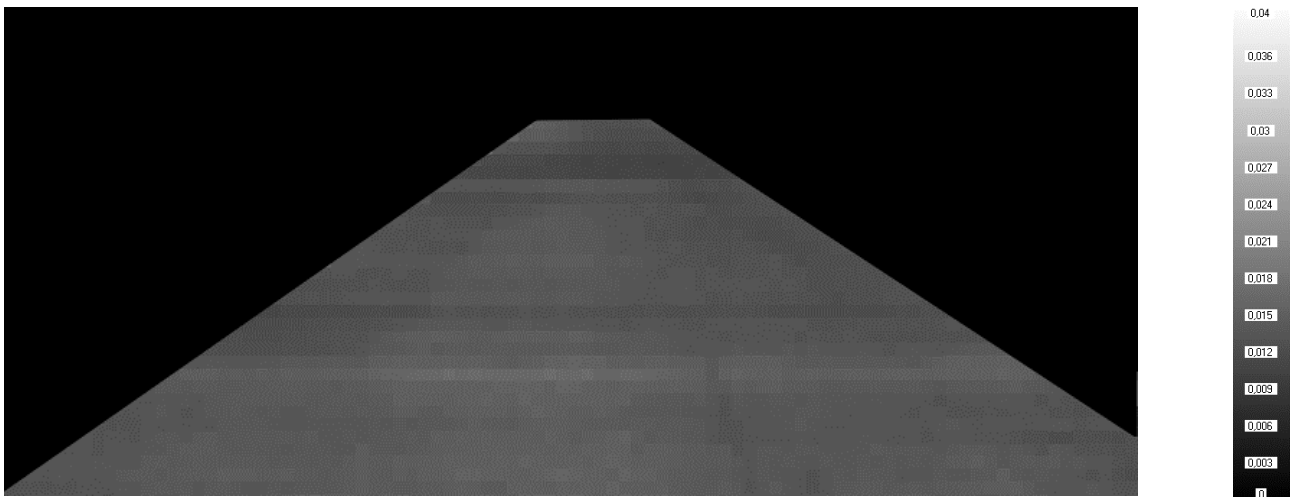


Abbildung 1: Leuchtdichtekoeffizienten der fahrbahneigenen Straßendeckschicht

Abbildung 1 zeigt den gemessenen Leuchtdichtekoeffizienten des Lichtkanals aus der Sicht des Beobachters in einer Auflösung von  $0,2^\circ$ . Je heller die Pixel dargestellt sind, desto höher ist der ihnen entsprechende Leuchtdichtekoeffizient. Es ist nur die eigene Fahrspur bis circa 100 m dargestellt. Alle Pixel, die nicht auf dieser liegen, sind schwarz. Es wird deutlich, dass der Lichtkanal sehr homogen ist. Er hat einen durchschnittlichen Leuchtdichtekoeffizienten von circa  $16 \text{ mcd}/(\text{lx m}^2)$

Die dargestellten Messwerte sind nur für genau einstellbare Scheinwerferlichtverteilungen reproduzierbar. Normale Scheinwerfer sind eher schwierig reproduzierbar einstellbar. Auf-

grund der Einstellunsicherheit kann es zu größeren Unterschieden zwischen den auf der Straße gemessenen und berechneten Beleuchtungsstärken bzw. Leuchtdichten kommen. Es wurde gezeigt, dass die gesuchten Leuchtdichtekoeffizienten mit Hilfe von bekannten, präzise einstellbaren Lichtverteilungen und geeigneten Messgeräten ermittelt werden können.

## Anwendung der Ergebnisse zur Berechnung von Scheinwerfergütemerkmalen am Beispiel der Erkennbarkeitsentfernung

Anhand der oben beschriebenen Messwerte für den Leuchtdichtekoeffizienten können Beleuchtungsstärkeverteilungen auf der Straßenoberfläche direkt in Leuchtdichteverteilungen aus Perspektive des Fahrers ermittelt werden. Leuchtdichteverteilungen ermöglichen eine Scheinwerferbewertung in Hinblick auf einige wahrnehmungsbasierte Kriterien, die auf Beleuchtungsstärkeverteilungen nicht oder nur mit schlechter Prädiktionsgüte angewandt werden können. Als Anwendungsbeispiel soll im Folgenden die Erkennbarkeitsentfernung dienen. Die Erkennbarkeitsentfernung meint die Entfernung, ab der ein Objekt vom Fahrzeugführer erkannt wird. Um diese Entfernung abzuschätzen existieren momentan im Wesentlichen zwei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit basiert auf Beleuchtungsstärkeverteilungen, die weder Eigenschaften des Hindernisses, wie Objektgröße, Reflexionsgrad bzw. seinen tatsächlichen Kontrast zum Hintergrund, noch den Adaptationszustand des Betrachters berücksichtigen. Das bedeutet, dass für große helle Objekte identische Erkennbarkeitsentfernungen vorhergesagt werden wie für dunkle kleine Objekte, was nicht der Realität entspricht. Die zweite Möglichkeit zur Ermittlung von Erkennbarkeitsentfernungen besteht in aufwendigen Versuchen mit einer repräsentativen Probandenstichprobe. Die auf diese Art gefundenen Erkennbarkeitsentfernungen entsprechen sehr genau der Realität, gelten aber ausschließlich die untersuchte Bedingung. Das bedeutet, sie gelten nur für genau diese Lichtstärkeverteilung, dieses Objekt, diese Straßenoberfläche und diese Umgebung. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Vorhersage von Erkennbarkeitsentfernungen im Gegensatz zu beleuchtungsstärkebasierten Verfahren deutlich zu verbessern bzw. im Vergleich zu experimentellen Verfahren durch deutlich weniger notwendigen Aufwand zu erleichtern. Zur Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernung sollen, genau wie bei beleuchtungsstärkebasierten Verfahren zunächst die Beleuchtungsstärken auf der Fahrbahndeckschicht berechnet werden. Diese sollen dann mit Hilfe der nach obigen Verfahren ermittelten Leuchtdichtekoeffizienten in orts aufgelöste Leuchtdichten überführt werden. Für das zu erkennende Objekt werden Größe und Reflexionsgrad  $\rho$  festgelegt und diffuse Reflexionseigenschaften angenommen. Beleuchtungsstärke, die durch Vorwärtsreflexion auf der Fahrbahn erzeugt wird, wird vernachlässigt. Somit kann die Objektleuchtdichte  $L_O$  mit Hilfe von Gleichung 5 aus auftretender Beleuchtungsstärke  $E$  und Reflexionsgrad  $\rho$  berechnet werden.  $\Omega_0$  meint den Einheitsraumwinkel und ist 1 sr.

Gleichung 5 
$$L_O = \frac{\rho \cdot E}{\pi \cdot \Omega_0}$$

Aus den Leuchtdichteinformationen für Objekt und das Umfeld, was von der Fahrbahndeckschicht gebildet wird, kann mit Gleichung 6 der vorhandene Kontrast zwischen Sichtziel und Untergrund bestimmt werden.

Gleichung 6 
$$C = \frac{L_O - L_U}{L_U}$$

Von der berechneten Leuchtdichte der Fahrbahndeckschicht kann auch auf das Adaptationsniveau des Fahrers geschlossen werden. Dies macht bei gegebener Größe des Objektes die Anwendung von Schwellenkontrastmodellen, beispielsweise dem Modell von Koschka [3] oder dem von Adrian [4], möglich. Durch die Anwendung dieser Modelle kann

der Schwellenkontrast bestimmt werden, der notwendig ist, um das Sehobjekt detektieren zu können. Setzt man den theoretischen Schwellenkontrast mit dem vorhandenen Kontrast ins Verhältnis, kann man auf die Sichtbarkeit, das heißt den Visibility Level (VL), des Objektes schließen.

Gleichung 7 
$$VL = \frac{C}{C_{th}}$$

Ist VL größer als eins, ist das Sehobjekt theoretisch sichtbar. Dass das Modell von Kokoschka [5] für Scheinwerferlichtverteilungen gültig ist, zeigte Kliebisch [6].

## Ausblick und Zusammenfassung

Das Ziel der beschriebenen Messungen ist es, zur Bewertung der Scheinwerfergüte nicht nur Beleuchtungsstärkeverteilungen heran zu ziehen, sondern auch Leuchtdichteverteilungen aus der Perspektive des Fahrers beurteilen zu können. Hierfür wurde das Reflexionsverhalten der Straßendeckschicht für verschiedene Winkelauflösungen bestimmt. Die untersuchte Vorgehensweise lieferte plausible Werte, kann jedoch hinsichtlich Genauigkeit und Auflösung verbessert werden. Die erfassten Werte können dazu verwendet werden, um Lichtstärkeverteilungen in Leuchtdichtebilder aus Fahrerperspektive zu generieren. Dies bietet den Vorteil Scheinwerferlichtverteilungen nach leuchtdichtebasierten Gütekriterien, die die menschliche Wahrnehmung gut widerspiegeln, zu bewerten ohne den Scheinwerfer zu fertigen, aufzubauen und die Leuchtdichten zu messen.

Die derzeitig vorliegenden Leuchtdichtekoeffizienten gelten nur für oben beschriebene Messgeometrie und natürlich nur für die vermessene Fahrbahndeckschicht. In nächsten Schritten sollen die orts- bzw. winkelaufgelösten Leuchtdichtekoeffizienten von realen Straßen ermittelt werden.

## Literatur

1. Schmidt-Clausen, H.-J.; Damasky, J.; Wambsganß, H.(1991): Einfluß der Helligkeit von Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei Nacht, Heft 629. Bundesministerium für Verkehr, TH Darmstadt, Forschungsbericht
2. Fleischer, K. (1984): Leuchtdichtevertellung auf Straßendecken durch kraftfahrzeugeigene Beleuchtung, TU Berlin, Fachbereich Umwelttechnik, Dissertation
3. Kokoschka, S. (1988). Zur Berechnung von Schwellenkontrasten für die Detektion einfacher Sehobjekte, LICHT (4)
4. Adrian, W. (1993): Visibilty level und die Sichtbarkeit in der Straßenbeleuchtung, LICHT (10)
5. Kokoschka, S.; Gall, D. (2000): FASIVAL – Entwicklung und Modellierung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrersichtweite. Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe, Fachgebiet Lichttechnik der technischen Universität Ilmenau, – Abschlussbericht
6. Kliebisch, D.; Völker, S. (2007): Detection Distance of Headlamp Light Distributions – New Methods for Calculation. Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting. Darmstadt, Germany, September 25-26, 2007, ISBN 978-3-8316-0711-2