

Reduzierung der Adaptationsleuchtdichte bei nasser Fahrbahn – Mehr Sicherheit oder erhöhte Blendung?

1. Kleinert, B.¹, 2. Schierz, Ch.², 3. Marutzky, M.¹, 4. Bogdanow, S.¹

¹) IAV GmbH, Gifhorn, Deutschland,

²) TU Ilmenau FG Lichttechnik, Ilmenau, Deutschland,
benedikt.kleinert@iav.de

ABSTRACT

Gute Sichtverhältnisse sind im Straßenverkehr besonders wichtig, da Informationen primär visuell aufgenommen werden. Diese Informationen tragen dazu bei, Hindernisse frühzeitig zu erkennen und somit die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen. Eine Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer ist dabei durch gezielte Ausleuchtung des Verkehrsraumes zu vermeiden. Trotz der Intelligenz heutiger automobiler Scheinwerfersysteme beeinflussen geänderte Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise eine regennasse Fahrbahn die eigentlichen Sichtverhältnisse. Die Folgen sind eine verringerte Adaptationsleuchtdichte für den Fahrer (das Licht wird stärker von ihm wegreflektiert) und eine bis zu einem Faktor 13 höhere Blendbeleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers. Dies ist hauptsächlich durch den indirekten, über die nasse Fahrbahn reflektierten, Blendanteil verursacht [1].

Durch eine regennasse Fahrbahn wird mehr Licht vorwärts reflektiert, wodurch Objekte besser ausgeleuchtet werden. Der geringere Anteil an rückwärts reflektiertem Licht führt jedoch durch die Herabsetzung der Adaptationsleuchtdichte zu einer höheren Blendempfindlichkeit des Fahrers. Dies muss nicht zwangsläufig eine negative Auswirkung auf die Sichtverhältnisse und speziell auf die Erkennbarkeitsentfernung haben, wie bereits Marutzky et al. [2] und Schmedding [3] ermittelt haben.

Inwieweit diese geänderten Umgebungsbedingungen, als auch die für ein Fahrzeug serienmäßig erhältlichen Scheinwerfer (Halogen, Xenon und LED) und deren Lichtverteilungen die Sichtverhältnisse sowohl positiv, als auch negativ beeinflussen, soll der nachfolgende Beitrag zeigen.

Schlagwörter: Adaptationsleuchtdichte, Blendbeleuchtungsstärke, Erkennbarkeitsentfernung, Objektcontrast, Schleierleuchtdichte

1 MOTIVATION

Informationen werden im Straßenverkehr primär visuell aufgenommen. Gute Sichtbedingungen, besonders bei Nacht und schlechtem Wetter, wie beispielsweise Regen, sind daher enorm wichtig, um die Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr zu erhöhen. Aus diesem Grund werden viele Bestrebungen unternommen, das Licht der Scheinwerfer im Straßenraum so zu verteilen, dass es dem Fahrer situationsbedingt die bestmögliche Ausleuchtung gibt. Rosenhahn [4] und von Hoffmann [5] haben beispielsweise lichttechnische Anforderungen für Schlechtwetterbedingungen und adaptive Lichtfunktionen erarbeitet.

Bei Messungen zur Gegenüberstellung des direkten und indirekten Blendanteils [1], verursacht durch einen Kfz-Scheinwerfer, wies ein in ca. 100 Metern Entfernung stehendes Verkehrszeichen einen um das 4,93-fache erhöhten Objektkontrast auf.

Welchen Einfluss geänderte Umgebungsbedingungen auf das Adaptationsniveau des Fahrers, das Kontrastverhältnis bestimmter Objekte zum Umfeld und die damit verbundene Erkennbarkeitsentfernung und zuletzt die resultierende Blendung haben, soll der nachfolgende Beitrag näherbringen.

Ferner soll gezeigt werden, wie das im Fahrzeug verbaute Lichtsystem und die dazugehörige Lichtverteilung die zuvor genannten Merkmale beeinflusst.

Ziel ist es, die gesammelten Erkenntnisse bei der Spezifikation einer adaptiven Abblendlichtverteilung für Schlechtwetterbedingungen zu berücksichtigen. Auf eine solche adaptive Verteilung wurde bereits von Rosenhahn [4] verwiesen, um während eines Passivvorgangs gleiche Blendungsverhältnisse zu realisieren. Das eigene Bestreben ist es, mit solch einer adaptiven Lichtverteilung die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen, den Fahrkomfort jedoch gleichzeitig nicht oder möglichst geringfügig zu beeinträchtigen.

2 THEORETISCHER HINTERGRUND

Sowohl aus bisherigen Arbeiten von Schmidt-Clausen und Schwenkschuster [6], als auch von Fischer [7] und eigenen Untersuchungen [1] geht hervor, dass die Blendbeleuchtungsstärke E_{BI} (lx) am Auge eines entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers bei regennasser Fahrbahn den nach ECE zulässigen Grenzwert von 0,4lx, bzw. 0,5lx¹ um ein Vielfaches überschreitet. Zudem zeigte sich, dass die indirekte Blendung hierbei den größeren Einfluss hat. Hierfür wurde die Formel $E_{GIR} = 1 + (E_{indirekt} / E_{direkt})$ definiert [8]. Diese ermöglicht es, eine Aussage über das Verhältnis von direktem zu indirektem Blendanteil (lx) zu treffen.

¹ In Abhängigkeit des eingesetzten Leuchtmittels. Bei Halogenleuchtmitteln 0,4lx und bei Gasentladungslampen 0,5lx. Mittlerweile wird in der ECE R112 [13] aber die zulässige Lichtstärke (cd) angegeben und nicht die Blendbeleuchtungsstärke (lx).

Die zuvor beschriebene Erhöhung der Blendbeleuchtungsstärke am Fahrerauge verursacht durch die sogenannte Schleierleuchtdichte L_s (cd/m^2) eine Herabsetzung der Sehleistung und stellt somit ein wesentliches Sicherheitsrisiko dar. Die geänderten Reflexionsbedingungen der Fahrbahnoberfläche tragen jedoch zu einer besseren Anleuchtung von Objekten bei. Die dunklere Umgebung führt zusätzlich zu einem erhöhten Objektkontrast. Der zuerst genannte Effekt zeigte sich in Voruntersuchungen an der geänderten Leuchtdichte eines Verkehrszeichens zur Umgebung. Die dunkler erscheinende Fahrbahn wurde aufgrund der erhöhten Anbauposition des Verkehrszeichens hier bei der Kontraständerung noch nicht berücksichtigt.

Physiologische Laboruntersuchungen von Schmidt-Clausen und Schwenkschuster [6] zu Folge müsste das angeleuchtete Objekt bei gleicher Umgebungsleuchtdichte eine zehnfach höhere Leuchtdichte besitzen, um dieses bei regennasser Fahrbahn und der vorhandenen Blendung ($>2\times$ in 50 Metern Entfernung [6]) vergleichbar wahrzunehmen. Aufgrund der Tatsache, dass im Falle einer nassen Fahrbahnoberfläche auch die Umgebungsleuchtdichte reduziert wird, soll dies im Rahmen des Beitrages untersucht werden. Ferner soll aufgezeigt werden, wie sich die serienmäßig erhältlichen Scheinwerfersysteme und deren zugehörige Lichtverteilungen auf die Erkennbarkeitsentfernung auswirken.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Teilbereiche kurz angeführt, die im Rahmen der Untersuchungen zum tragen kommen.

2.1 REFLEXIONSEIGENSCHAFTEN DER FAHRBAHN

In Abhängigkeit des Feuchtigkeitszustandes der Fahrbahnoberfläche variiert deren Reflexionsverhalten. Eine Darstellung von Krebs und Böllinger [9] veranschaulicht dies. Weist eine trockene Fahrbahnoberfläche zunächst noch eine diffuse Reflexion auf, verändert sich dies im Falle einer feuchten Fahrbahnoberfläche bereits in eine teilgespiegelte Reflexion. Ist die Fahrbahnoberfläche komplett mit Wasser benetzt, resultiert hieraus eine gespiegelte Reflexion. Konstante und wiederholbare Verhältnisse des Nässegrades sind nur mit enormem Aufwand zu gewährleisten und daher in den meistens Forschungsprojekten nicht tragbar [6]. Aus diesem Grund werden in der Regel die entsprechenden Extrema trocken und nass näher betrachtet. Auch so in den eigenen, nachfolgenden Untersuchungen mit der Abwandlung, dass die nasse Fahrbahn nicht mittels eines Wasserfilms, sondern einer Folie realisiert wird. Diese verändert ebenfalls die Reflexionseigenschaften von diffus nach gerichtet. So auch von Schmidt-Clausen und Schwenkschuster in Labor-Untersuchungen [6] verwendet. Erste Untersuchungen zeigten, dass die entfernungsabhängigen Blendbeleuchtungsstärken am Fahrerauge sowohl mit den erzielten Messergebnissen von Schmidt-Clausen und Schwenkschuster [6], als auch von Fischer [7] vergleichbar sind.

2.2 ADAPTATIONSLEUCHTDICHTE

Die Adaptationsleuchtdichte L_{ad} (cd/m^2) entspricht der Leuchtdichte, auf welche das Auge während einer nächtlichen Fahrt adaptiert. Folglich ist durch diese Leuchtdichte vorgegeben,

wie blendempfindlich das Auge reagiert. Kfz-Scheinwerfer liefern im nächtlichen Straßenverkehr Umfeldleuchtdichten L_U (cd/m²) von ca. 0,1cd/m² bis ca. 0,01cd/m² abhängig ob die Fahrbahnoberfläche trocken oder nass ist [6].

Welcher Bereich ist aber relevant zur Ermittlung der Adaptationsleuchtdichte? Aus Untersuchungen von Winter [11] bezüglich des Fixationsverhaltens von Fahrzeugführern auf innerstädtischen Straßen geht hervor, dass 89% der Fixationen innerhalb einer 10°/20° Ellipse liegen. Diese wird bei den eigenen Untersuchungen zur Ermittlung der Adaptationsleuchtdichte herangezogen.

2.3 KONTRAST

Im Bereich der automobilen Lichttechnik wird der dimensionslose Weber-Kontrast C verwendet. Dieser berechnet sich aus dem Quotienten der Leuchtdichtedifferenz von Objekt zu Umfeld und der Umfeldleuchtdichte (siehe Formel (1)).[12]

$$C = \frac{|L_o - L_u|}{L_u} \quad (1)$$

wobei

- L_o Objektleuchtdichte (cd/m²)
- L_u Umfeldleuchtdichte (cd/m²)

Eine zusätzliche Blendquelle verursacht die in Kapitel 0 (Formel 2) beschriebene Schleierleuchtdichte L_S , welche sowohl die Umfeld-, als auch die Objektleuchtdichte vergrößert und dadurch den Kontrast nach Weber herabsetzt.

2.4 BLENDBELEUCHTUNGSSTÄRKE E_{Bl}

Die Blendbeleuchtungsstärke E_{Bl} (lx) ist die am Auge eines Fahrers gemessene Beleuchtungsstärke. Für diese wurde in der ECE Regelung 112 [13] ein zulässiger Grenzwert festgelegt. Hierbei wird sich auf einen einzigen Punkt, den sogenannten Punkt B50L bezogen. Diesem liegen, referenziert auf die optische Achse des Scheinwerfers, ein Horizontalwinkel von 3,43° und ein Vertikalwinkel von 0,57° zugrunde. Aufgrund der zuvor genannten Bewertung bleiben nachfolgende Aspekte unberücksichtigt:

- Der indirekte Blendanteil
- Die Blendbelastung während des Passiervorgangs. [14]
- Die Position der Scheinwerfer im Verkehrsraum.

Die zuvor genannten Punkte eins und drei werden im Rahmen der Untersuchungen berücksichtigt. Die gemessene Blendbeleuchtungsstärke wird anschließend genutzt, um die resultierende Schleierleuchtdichte L_S (cd/m²) zu ermitteln. Hier wird die Berechnung nach Holladay (Formel (2)) [15] herangezogen.

$$L_s = k * \frac{E_{Bl}}{\theta^2} \quad (2)$$

wobei

- k Altersfaktor (-)
- E_{Bl} Blendbeleuchtungsstärke (lx)
- θ Horizontaler Blendwinkel (°)

2.5 ERKENNBARKEITSENTFERNUNG

Zur Ermittlung der Erkennbarkeitsentfernung gibt es verschiedene Methoden. Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchung wird diese anhand von Kontrasten ermittelt [16]. Als Referenzobjekt kommt ein graues Target mit den Abmaßen 30x30 zum Einsatz.. Mit Hilfe des Objektes soll ermittelt werden, welchen Einfluss zum einen die Reflexionseigenschaft der Fahrbahnoberfläche und zum anderen die Lichtverteilung des jeweiligen Scheinwerfersystems (siehe Kapitel 2.6) haben. Das Target dient daher als Vergleich und nicht für eine realitätsnahe Abbildung. Basierend auf den Erkenntnissen von Völker [16] wird zur Bewertung der Erkennbarkeit die Kante des Referenztargets genommen, welche zum Umfeld den höchsten Kontrast aufweist.

2.6 DIE LICHTVERTEILUNGEN

In Abbildung 1 sind die Lichtverteilungen der zu vergleichenden Scheinwerfersysteme gegenübergestellt. Als Anbauhöhe wurden 0,65m gewählt. Als anfängliches Vergleichskriterium wurde die 2 lx Linie und deren Schnittpunkt mit dem rechten Fahrbahnrand gewählt. Hierbei zeigte sich, dass die Schnittpunkte in Entfernungen von ca. 62m (LED), 73m (Halogen) und über 93m (Xenon) liegen. Anhand dieses Kriteriums kann allerdings noch keine Aussage über die jeweilige Erkennbarkeitsentfernung getroffen werden.[16]

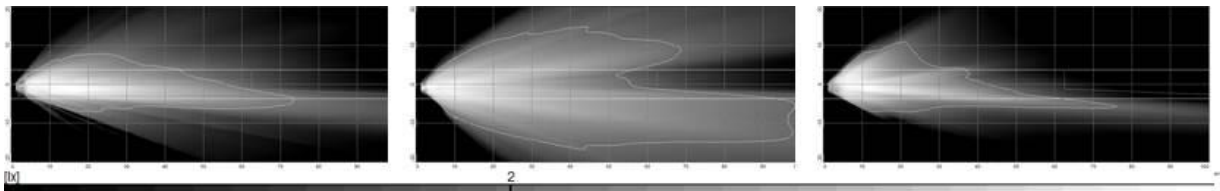


Abbildung 1 – Gegenüberstellung der zu vergleichenden Lichtverteilungen von Serienscheinwerfer desselben Fahrzeuges bei einer Anbauhöhe von 0,65m (li.: Reflexionssystem – Halogen, Mitte: Projektionssystem – Xenon, re.: Projektionssystem – LED)

3 METHODE

Die Untersuchungen werden in Form von statischen Freifeld-Messungen durchgeführt. Zunächst handelt es sich um rein physiologische Blendungsuntersuchungen. Als Referenzszene dient hierfür die IAV eigene Applikationsstrecke in Gifhorn ohne ortsfeste

Beleuchtungseinrichtungen am Straßenrand. Die Referenzszene inklusive der geometrischen Abmessungen ist in Abbildung 2 dargestellt.

Draufsicht - Straßenszene

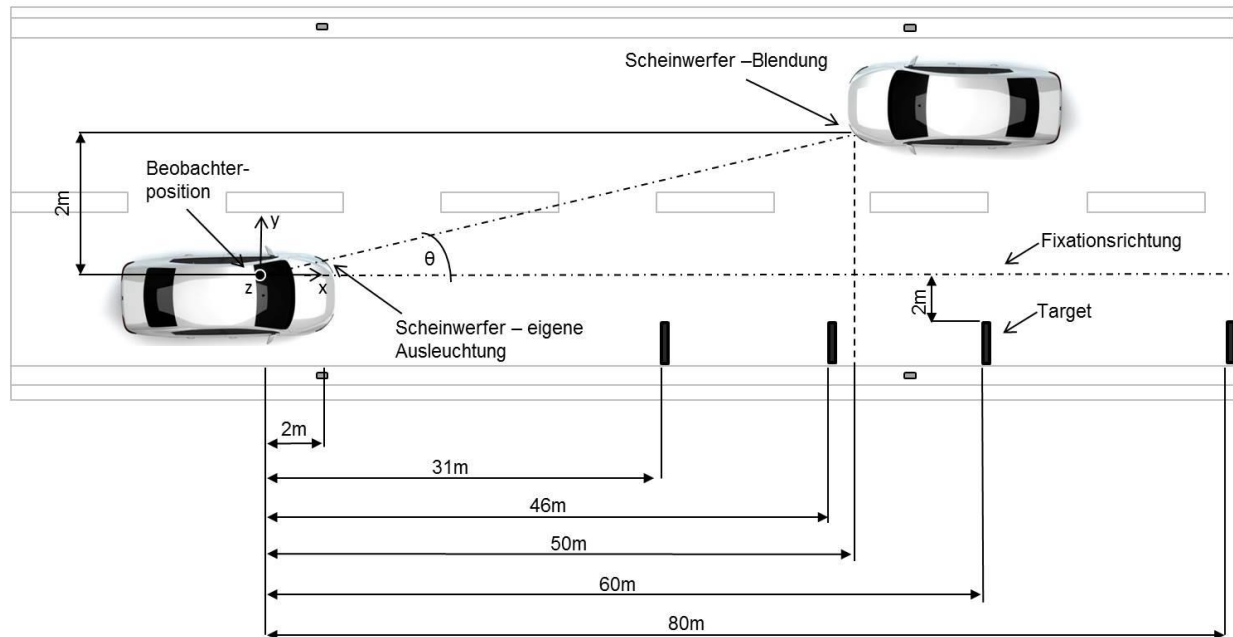


Abbildung 2 – Referenzszene zur Analyse der geänderten Sichtbedingungen aufgrund unterschiedlicher Scheinwerfer und deren Lichtverteilungen und der Reflexionseigenschaften der Fahrbahn

Im linken unteren Bereich der Abbildung ist der Scheinwerfer (schematisch am Fahrzeug dargestellt) positioniert, welcher zur Ausleuchtung der eigenen Fahrbahnseite dient. Dieser ist für die jeweils vorhandene Adaptationsleuchtdichte L_{ad} (cd/m^2) in Abhängigkeit der Reflexionseigenschaften der Fahrbahn verantwortlich. Im rechten oberen Bereich der Abbildung, auf der entgegenkommenden Fahrspur, befindet sich ebenfalls ein Scheinwerfer (schematisch am Fahrzeug dargestellt). Dieser ist in x-Richtung in 50 Metern und in y-Richtung in zwei Metern Entfernung zum Beobachter positioniert. Die x-Position wurde aufgrund der Erkenntnisse der stärksten Reduzierung der Sehleistung gewählt, welche durch eigene Untersuchungen bestätigt wurden. Der y-Versatz ergibt sich anhand der ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilung eines entgegenkommenden Augenpaares nach Damasky [17].

Die Blendbeleuchtungsstärke E_{Bl} (lx) wird mit Hilfe des Photometers Pocket Lux 2 der Firma LMT (Klasse B) gemessen. Dieses wird an der Beobachterposition mit horizontaler Ausrichtung in einer Höhe von 1,2 Metern positioniert.

Um neben der Blendbeleuchtungsstärke Aussagen über die jeweilige Adaptationsleuchtdichte treffen zu können, wird neben dem Photometer die Leuchtdichtemesskamera LMK 98-4 color

der Firma Technoteam positioniert. Zur Messung der hohen Leuchtdichten im Falle der aktiven Blendquelle kommt ein zusätzlicher Neutralgrauglasfilter zum Einsatz.

Zur Ermittlung des Objektkontrastes wird ein Target am rechten Fahrbahnrand aufgestellt. In Anlehnung an Untersuchungen von Schmidt-Clausen und Schwenkschuster [6] wird das Target in einer Beobachtungsentfernung von 31m (Fixations-Schwerpunkt bei nasser Fahrbahn) und 46 Metern (Fixations-Schwerpunkt bei trockener Fahrbahn) plaziert. Des weiteren werden Entfernungen von 60 und 80 Metern (x-Richtung) gewählt, bei denen eine Hinterleuchtung des Targets ausgeschlossen ist. Referenziert auf die Fixationsachse befindet es sich in einem y-Versatz von zwei Metern (Linke Kante Target).

Der jeweilige Objektkontrast dient später zur Bewertung der Erkennbarkeitsentfernung in Abhängigkeit der vorgenommenen Änderungen. Dem Gegenüber wird die jeweils vorhandene physiologische Blendung ermittelt, mit der eine Reduzierung der Sehleistung einhergeht.

Folgende Änderungen werden im Rahmen der Untersuchungen vorgenommen:

- Wechsel des Scheinwerfers zur Ausleuchtung der eigenen, rechten Fahrspur
 - 1.Halogen 2. Xenon 3.LED
- Wechsel des Scheinwerfers zur Ausleuchtung der entgegenkommenden, linken Fahrspur
 - 1.Halogen 2. Xenon 3.LED
- Variation der Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche
 - Diffuse Reflexion (Standard Asphaltdeckschicht der IAV-Applikationsstrecke)
 - Gerichtete Reflexion (Modifikation durch Aufbringen einer Folie)

Zur Gegenüberstellung der beiden Fälle dient Tabelle 1.

Tabelle 1 Einfluss des Fahrbahnzustandes (trocken/nass) auf die einzelnen Teilbereiche

| | Fall 1 (trocken) | Fall 2 (nass) |
|---|---|----------------------|
| Reflexionseigenschaften der Fahrbahn | Diffuse Reflexion | Gerichtete Reflexion |
| Adaptationsleuchtdichte L_{ad} (cd/m ²) | Fall 1 > Fall 2 | |
| Kontrast C (-) | Hypothese: Fall 1 < Fall 2 | |
| Erkennbarkeitsentfernung (m) | Hypothese: Fall 2 > Fall 1, sofern nachgewiesen werden kann, dass C im Fall 2 > Fall 1 ist. | |
| Blendbeleuchtungsstärke E_{bl} (lx) | Fall 2 >> Fall 1 | |

4 ERGEBNISSE

Zum Zeitpunkt der Einreichung des Tagungsbeitrages lagen noch keine Ergebnisse vor, da die Messungen und deren Auswertung noch nicht vollständig abgeschlossen gewesen sind. Folglich werden diese im Rahmen des Vortrages vorgestellt.

QUELLEN

- [1] Kleinert, B., et al., (2013), *Glare evaluation of automotive headlamps – What is measured and what's not?*, Vortrag am 27.09.2013, LuxJunior 2013, Dörnfeld
- [2] Marutzky, M., et al., (2013), Testen am gesamten Lichtsystem, *ATZ* 11/2013
- [3] Schmedding, K., (2007), Kapitel 5.3 Der Dunkelheitsunfall. *Unfallrekonstruktion*, Band 2, , S.703 ff., Verlag autoren team, Münster 2007
- [4] Rosenhahn, E.-O., (1999), *Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen*, München, Herbert Utz Verlag GmbH 2000, 164 Seiten
- [5] Hoffmann v., A., (2003), *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*, Osnabrück, Der andere Verlag, 186 Seiten
- [6] Schmidt-Clausen, H.-J., Schwenkschuster, L., (2001) *Einfluss der Helligkeit und des Reflexionsverhaltens von nassen Fahrbahnoberflächen auf die Seh- und Wahrnehmungsbedingungen von Kraftfahrern bei Nacht*, Bundesministerium für Verkehr, Heft 812
- [7] Fischer, J., (2014), *Adaptive Schlechtwetterlichtverteilung zur Reduzierung der indirekten Blendung entgegenkommender Verkehrsteilnehmer auf nassen Fahrbahnen*, LICHT 2014, Den Haag
- [8] Kleinert, et. al., (2013), *The ratio of glare*, Tagungsbeitrag, ISAL 2013, Darmstadt
- [9] Krebs, Böllinger, (1981), *Beurteilung und Erfassung von Nässezuständen auf der Fahrbahn*, Schlussbericht FA 4075 G 79 G, Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe
- [10] Schierz Ch., (2010), *Physiologische Optik*, Vorlesungsskript, TU Ilmenau, FG Lichttechnik
- [11] Winter, J., Völker, S., (2013), *Typical eye fixation areas of car drivers in innercity environments at night*, LuxEuropa 2013, Krakau
- [12] CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), (1992), *Contrast and Visibility*, CIE-Publication No. 95, Seite 15
- [13] ECE 112, (2013); *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing-beam or a driving-beam or both and equipped with filament lamps and/or light-emitting diode (LED) modules*
- [14] Kleinert, B., (2014) *Simulative Bewertung von Kfz-Lichtverteilungen auf deren entfernungsabhängiges Blendpotential*, Blendungworkshop TU Darmstadt, (unveröffentlicht)
- [15] CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), (2002), *Equations for disability glare*, No. CIE 146:2002
- [16] Völker, S., (2006), *Hell- und Kontrastempfindung – Ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern*, Paderborn
- [17] Damasky, J., (1995), *Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer*, Darmstädter Dissertationen D17