

Entwicklung erweiterter Bewertungskriterien zur Dimensionierung innovativer ortsfester Beleuchtung

Sebastian Schade, TU Berlin, Sebastian.Schade@TU-Berlin.de

Peter Krenz, TU Berlin,

Florian Förster, TU Berlin

Raphael Kirsch, TU Berlin

1 Einleitung

Im Rahmen einer immer ökologischer und energieeffizienter orientierten Betriebsweise ortsfester Straßenbeleuchtung sind die Anforderungen an deren Planung und Dimensionierung in den letzten Jahren wesentlich komplexer geworden. Zwar beträgt der Anteil der Straßenbeleuchtung am gesamtdeutschen Stromverbrauch für die Lichterzeugung lediglich 6 bis 7 Prozent und am nationalen Gesamtstromverbrauch 10 bis 11 Prozent [1], trotzdem fallen enorme Energiekosten für die Kommunen an [2]. Um Energiekosten zu sparen, werden deshalb in den installierten Leuchten meist einzelne Lampen (z.B. eine von zwei) die ganze Nacht über abgeschaltet. Dies führt zu einer erheblichen Verschlechterung der Beleuchtungsqualität und einer Senkung des Beleuchtungsniveaus. Eine Einsparung von Betriebskosten auf diese Weise gefährdet somit die nach DIN 5044 – 1 [1, 3] geforderte allgemeine Sicherheit im Straßenverkehr. Dies zieht die Forderung nach sichereren Betriebsalternativen nach sich. Oftmals treten zusätzliche gesetzliche und politische Einschränkungen auf. So darf zum Beispiel in manchen Kommunen das Beleuchtungsniveau nicht erhöht werden, da sonst Anwohner finanziell belastet werden müssten [4, 5]. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Projektes „Innovative Beleuchtung“ an der TU Berlin neue Möglichkeiten innovativer und energieeffizient arbeitender Beleuchtungskonzepte entwickelt.

2 Untersuchung aktueller Straßenszenarien von Wohngebieten

Zur Bewertung der aktuell installierten Straßenbeleuchtung wurden vier Anliegerstraßen und Nebenerschließungsstraßen untersucht. Davon drei mit historischer Gasbeleuchtung und eine auf Leuchtstofflampenbasis mit einer ganznächtlichen Absenkung des Beleuchtungsniveaus zur Verringerung des Energiebedarfs. Die Bewertung erfolgte im Rahmen der bei einem Feldversuch gegebenen Möglichkeiten nach DIN EN 13201 [6]. Die Straßen sind den Beleuchtungssituationen B2 bzw. D4 und den Beleuchtungsklassen S4 bzw. S5 zuzuordnen.

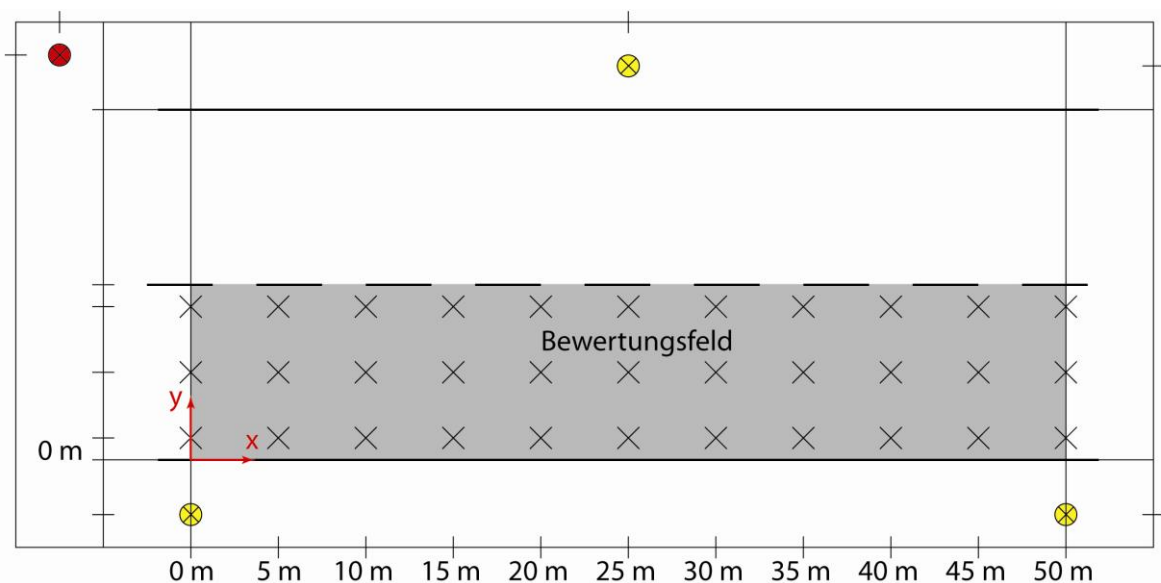
2.1 Bestandsaufnahme im Feld

In jeder Straße werden Messungen zur horizontalen und vertikalen Beleuchtungsstärke nach Abbildung 1 und zur vorhandenen Leuchtdichte- und Objektkontrastsituation nach Abbildung 2 sowie den relevanten Umgebungsvariablen durchgeführt und dokumentiert. Dabei wird darauf geachtet, gleichbleibende

Umgebungsvariablen und damit vergleichbare Messbedingungen zu garantieren und so eine Vergleichbarkeit zwischen den untersuchten Szenarien zu geben. Dies beinhaltet, dass die Werte der Umgebungsbeleuchtungsstärke bei jeder Messung $< 0,1 \text{ lx}$ betragen und sich keine parkenden Fahrzeuge im Bereich des Messfeldes aufhielten. Außerdem wurde die Umgebungstemperatur zu Beginn und Ende der Messungen überprüft. Die Temperaturdifferenz lag über den Zeitraum eines Messabends hinweg bei maximal 4° C . Bei Betrachtung aller Messabende betrug der maximale Temperaturunterschied 12° C . Zur Kontrolle der Periodizität der Beleuchtungsverhältnisse entlang einer Leuchtenreihe wurden zusätzlich zu den nach DIN EN 13201 [6] geforderten Messungen weitere Messpunkte vor und hinter dem Bewertungsfeld festgelegt.

2.1.1 Bestandsaufnahme auf Basis der Beleuchtungsstärke

Die Messung der Beleuchtungsstärkeverteilungen beinhaltet das Erfassen der Verteilung von horizontaler und vertikaler Beleuchtungsstärke. Die Messpunkte verteilen sich dabei nach den Vorgaben aus DIN EN 13201-3 [7] auf der Messreihen analog Abbildung 1, wobei die Anzahl der Messpunkte je Reihe bei $N \geq 10$ liegt (DIN EN 13201-3 fordert lediglich $N = 10$). An den selben Messpunkten wird folgend die vertikale Beleuchtungsstärke in Richtung des Beobachters gemessen.



Skizze nicht maßstabsgetreu

Messung Nr. x: Bewertungsfeld zur Messung der Beleuchtungsstärke

- × Bewertungspunkte
- Störlichtquelle
- ⊗ Laternenmast: h [m]
- Messort: Musterstraße
- Messbeginn: 21:00 Uhr
- Verkehrsdichte: [Kfz je Minute]
- Außentemperatur: T [°C]

Abbildung 1: Beispiel und schematische Skizze des Bewertungsfeldes zur Messung der Beleuchtungsstärken

2.1.2 Bestandsaufnahme auf Basis der Leuchtdichte

Die durchgeführten Aufnahmen der Leuchtdichteverteilung dienen neben der Bestimmung der Leuchtdichteverteilung im Messfeld vor allem als Grundlage der Berechnung von Objektkontrasten. Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Bewertungspunkte im Messfeld. An mindestens 10 Punkten entlang der Mitte eines Fahrstreifens wird ein Referenzobjekt positioniert und mit einer Leuchtdichtekamera aufgenommen. Der Abstand der Punkte liegt bei $D = S/N$, mit dem Leuchtenabstand S bei N Bewertungspunkten.

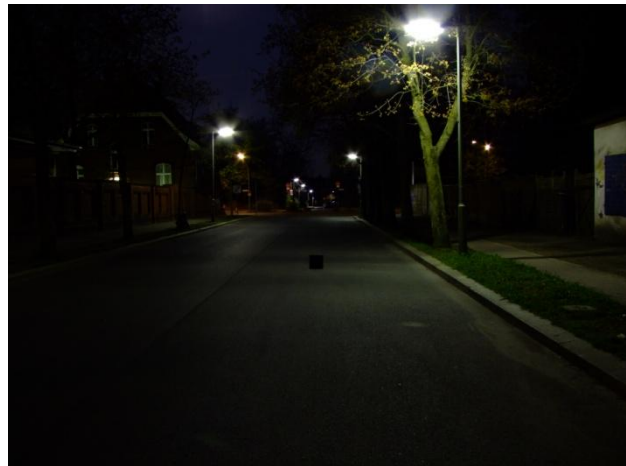
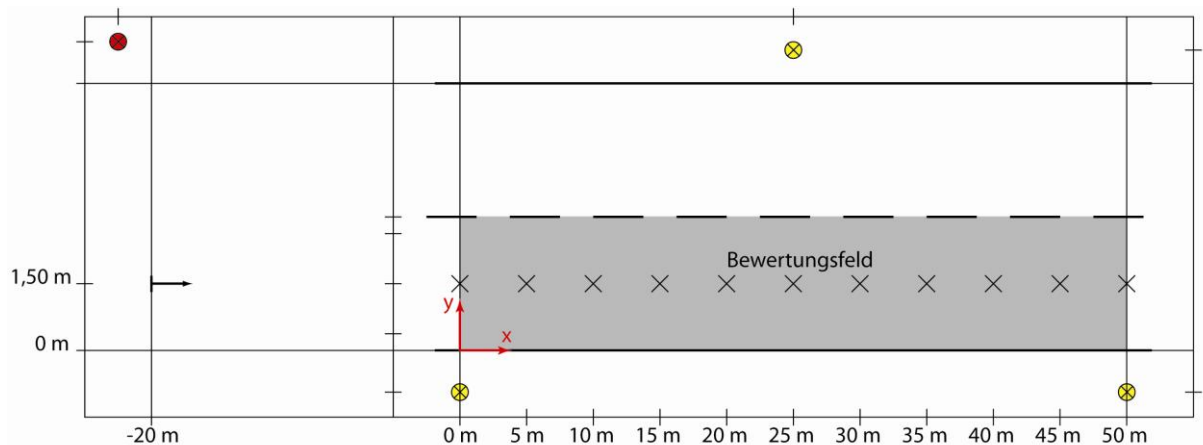


Abbildung 2: Foto einer Straße mit Referenzsehobjekt ($\rho = 4\%$) am Anfang des Messfeldes auf Höhe der vorderen Leuchte

Als Referenzobjekt dienen zwei 30 cm x 30 cm große Graukarten mit den Reflexionsgraden 4 % und 6,5 % analog Abbildung 2 positioniert.

Da es sich bei den vorgenommenen Messungen um Messungen im freien Feld handelt, kann ein konstanter Abstand von Beobachter (also Position der Leuchtdichtekamera) zum Bewertungsfeld nicht immer gewährleistet werden, was für die Messungen der Leuchtdichte als vernachlässigbar angenommen werden kann. Das für die Messung gewählte Objektiv der Leuchtdichtekamera erfordert jedoch mindestens einen Abstand von 15 m bis zum Anfang des Messfeldes.



Skizze nicht maßstabsgetreu

Messung Nr. x: Bewertungsfeld für Leuchtdichtebilder

→	Position des Beobachters
x	Bewertungspunkte
●	Störlichtquelle
⊗	Laternenmast:
	h [m]
	Messort: Musterstraße
	Messbeginn: 21:00 Uhr
	Verkehrsdichte: [Kfz je Minute]
	Außentemperatur: T [°C]

Abbildung 3: Beispiel eines Bewertungsfeldes zur Aufnahme von Leuchtdichtebildern

2.2 Auswertung und Ergebnisse

Im Rahmen der durchgeführten Messungen zur Beleuchtungsstärkeverteilung nach DIN EN 13201 – 3 [7] wurden die entsprechenden vertikalen und horizontalen Beleuchtungsstärken gemessen. Daraus wurde für jede untersuchte Straße für jeweils die horizontale und vertikale Beleuchtungsstärke die Gesamtgleichmäßigkeit U_0 , die Längsgleichmäßigkeit U_1 sowie die durchschnittliche, minimale und maximale Beleuchtungsstärke ermittelt. Die Verteilung von horizontaler und vertikaler Beleuchtungsstärke wurde zudem auch als matrixbasiertes Gebirge visualisiert. Es zeigte sich, dass die nach Norm geforderten durchschnittlichen Beleuchtungsstärken lediglich bei einer der fünf Straßen eingehalten wurden (3,20 lx gemessen, 3,0 gefordert). In den anderen Fällen wurde diese jeweils erheblich unterschritten (0,64 lx gemessen, 3,0 lx gefordert, bzw. 1,78 lx und 2,81 lx gemessen, 5,0 lx gefordert). Die Mindestbeleuchtungsstärken wurden bei den beiden Straßen der Beleuchtungsklasse S4 (0,25 lx und 0,75 lx bei geforderten 1,0 lx). Die geforderte Gesamtgleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke von 0,4 wurde in keiner der Straßen erreicht. Auch die nach der vergleichbaren Beleuchtungsklasse geforderte Längsgleichmäßigkeit wurde durchgehend unterschritten. Die Untersuchung zeigt anhand des Gütekriteriums Beleuchtungsstärke, dass keine der vorgefundenen Straßenbeleuchtungsanlagen lichttechnisch betrachtet den Empfehlungen der Norm DIN EN 13201 [6] entspricht.

Aufgrund dessen wurden im Rahmen der Leuchtdichtemessung die Objektkontrastverhältnisse im Bereich des Messfeldes ermittelt und ausgewertet. Dabei gilt der als Wahrnehmungskriterium herangezogene Schwellenkontrast als der Objektkontrast, bei dem 50 % der Beobachter ein Objekt erkennen. Es wird unterschieden zwischen einer Betrachtung der Objekte als einfache Sehobjekte ohne Einbeziehung der Adaptationsleuchtdichte nach Weber (Formel 2.1) und in eine Bewertung der Objektkontraste unter Einfluss der Adaptationsleuchtdichte nach Gleichung 2.2 [10].

$$C = \left| \frac{L_O - L_U}{L_U} \right| = \left| \frac{\Delta L}{L_U} \right| \quad (2.1)$$

$$C_{str} = \frac{(L_O + L_{s,\ddot{a}q}) - (L_U + L_{s,\ddot{a}q})}{L_U + L_{s,\ddot{a}q}} = \frac{L_O - L_U}{L_U + L_{s,\ddot{a}q}} \quad (2.2)$$

C	Sehobjektkontrast für einfache Sehobjekte nach Weber
C_{str}	effektiver Sehobjektkontrast zur Berücksichtigung des Netzhautstreulichtes
L_O	Sehobjektleuchtdichte
L_U	Untergrundleuchtdichte
$L_{s,\ddot{a}q}$	hier: Äquivalente Streulichtdichte am Ort des Sehobjektes. Summe der Leuchtdichten aller Umfeldelemente innerhalb eines 2° Betrachterwinkels.

Nach dieser Bewertung aus wahrnehmungsphysiologischer Sicht ergeben sich weitere Kritikpunkte des derzeitigen Zustandes öffentlicher Beleuchtungsanlagen. Die Auswertung zeigt, dass es sich bei allen Kontrasten um Positivkontraste handelt. Das heißt, dass die Objektleuchtdichte grundsätzlich geringer ist, als die Leuchtdichte des Umfeldes bzw. der Umgebung. Sämtliche Kontraste fallen sehr gering aus und bewegen sich unterhalb der Schwellenkontraste, so dass ein sicheres Erkennen des Sehobjektes unwahrscheinlich ist.

Eine direkte Abhängigkeit der Ergebnisse vom Adaptationszustand des menschlichen Auges konnte für keines der angewandten Kontrastmodelle festgestellt werden. Allerdings ist abhängig von dem Berechnungsmodell der Kontraste ein Zusammenhang mit der Gleichmäßigkeit der Beleuchtung zu erkennen. Die Kontraste unterliegen im Bewertungsfeld mit geringeren Gleichmäßigkeiten stärkeren Schwankungen und nehmen im Bereich der Tarnzonen ihre geringsten Werte an.

Darüber hinaus unterschieden sich die Ergebnisse der Kontrastmodelle vor allem abhängig von der zum Tragen kommenden Leuchtdichte des Umfeldes bzw. Untergrundes.

Die schlechten Kontrasteigenschaften der Straßenbeleuchtung stellen ein Sicherheitsrisiko für sämtliche Verkehrsteilnehmer dar. Die direkte Gegenüberstellung der betrachteten Szenarien im Rahmen dieser Untersuchung macht deutlich, dass mit den traditionellen Energieeinsparmaßnahmen wie einer ganznächtlichen Absenkung des Beleuchtungsniveaus (hier im Falle der durch Leuchtstofflampenbeleuchtung) und veralteten Beleuchtungsmethoden wie Gasbeleuchtung eine Wahrnehmung und Detektion eines auf der Straße auftauchenden Objektes nur schwer möglich ist. Aus diesem Grund sind große Potentiale und ein entsprechender Handlungsbedarf zur Verbesserung der Qualität der Beleuchtung auf Berliner Straßen vorhanden. So gilt es auch aufgrund der verhältnismäßig langen Standzeiten von Straßenbeleuchtungsanlagen entsprechend nachhaltige Konzepte für eine innovative und energieeffiziente Straßenbeleuchtung zu entwickeln. Dabei sollte keineswegs die heute oft im Vordergrund stehende Energieeffizienz auf Kosten der Verkehrssicherheit optimiert werden.

2.2.1 Empfehlung der Bewertungskriterien

Anhand der Untersuchung zeigen sich zwei problematische Ausprägungen an Teilen heutiger Beleuchtungsanlagen, die mit einer Unterschreitung der Beleuchtungsanforderung nach DIN 13201 einhergehen. Zum einen gibt es veraltete und von daher zu überholende Beleuchtungsanlagen und zum anderen Beleuchtungsanlagen, die zum Einsparen des Energieverbrauchs auf ein Beleuchtungsniveau unterhalb der von der Norm geforderten Rahmenbedingungen abgesenkt werden (meist Abschalten 50% der Leuchtmittel). Beide Fälle stellen in diesem Zustand nach DIN EN 13201 ein Sicherheitsrisiko dar. Dies bestätigen auch die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Berechnungen zu den Objektschwellenkontrasten, nach welchen die Referenzobjekte mit großer Wahrscheinlichkeit in der entsprechenden Entfernung des Anhalteweges bei

vorgegebener Geschwindigkeit in der Straße nicht erkannt worden wären. Die Objektschwellenkontraste lieferten im Rahmen unserer Untersuchung wesentlich aussagekräftigere Daten zu den Sichtverhältnissen auf der Fahrbahn als die Verteilung von Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke, da sie die an Objekten vorherrschenden Schattenbedingungen berücksichtigen. So zeigte sich, dass trotz hoher Beleuchtungsstärke in Nähe der Leuchten schlechtere Objektkontraste auftraten als im Bereich zwischen zwei Leuchten, da dort die vom Objekt selbst geworfenen Schatten sich maßgeblich auf den Objektkontrast auswirkten [6]. Somit eignen sich Objekt- und Objektschwellenkontrast sehr gut als ein erweitertes Bewertungskriterium zur Bewertung und Dimensionierung ortsfester Straßenbeleuchtung. Die differenzierte Betrachtung der Objektkontraste und der Adaptionisleuchtdichte zeigte jedoch nur begingt Vorteile.

Kritisch ist dabei zu bewerten, dass nicht nur die Gleichmäßigkeiten, sondern vor allem die Beleuchtungsniveaus teils deutlich unterschritten wurden. Eine Absenkung des Beleuchtungsniveaus unter die Minimalwerte für Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke ist daher nicht zu empfehlen.

3 Akzeptanzuntersuchung zum Ersatz bestehender Leuchten mit innovativer Beleuchtung

Viele Beleuchtungsanlagen sind, vor allem in größeren Städten, eng mit dem etablierten Stadtbild verbunden. Der Ersatz einer solchen oftmals historischen Beleuchtung durch eine vollkommen andersartige Beleuchtung führt oftmals zum Widerspruch in der Bevölkerung und politischen Kontroversen. Gerade bei der Einführung neuer Beleuchtungstechnologien muss darauf Rücksicht genommen werden. Zu diesem Zweck wurde in eine historische Gasaufsatzleuchte ein LED basiertes Modul eingesetzt, mit der Auflage eine möglichst perfekte Imitation der ursprünglichen Glühstrümpfe zu schaffen. Um dies zu erreichen wurden Hochleistungsleds entwickelt, deren Farbort nahezu exakt dem der Gasleuchte entspricht. Zur Überprüfung dieses Anspruches wurde eine Akzeptanzuntersuchung durchgeführt.



Abbildung 4: Historische Leuchte auf LED-Basis (li.) und konventionell mit Gas betrieben (re.).

3.1 Beschreibung der Untersuchung

Zur Bewertung der Akzeptanz zur Integration neuer innovativer Beleuchtungstechniken in historische Stadtbilder wurde die dafür entwickelte LED-Leuchte (siehe Abbildung 4, li.) auf einen handelsüblichen Leuchtenmast für Gasaufsatzleuchten montiert. Der Lichtstrom wurde zuvor gemessen und dem der Gasaufsatzleuchte angepasst.

Es wurden 27 Probanden befragt. Die Stichprobe setzte sich alters- und geschlechts-heterogen zusammen. Zwei Beobachterentfernungen wurden festgelegt. Entfernung 1, nah an der Leuchte hatte einen radialen Abstand von 1 m. Entfernung zwei lag weiter entfernt radial bei 5 m.

3.2 Ergebnisse der Untersuchung

Selbst bei genauerer Betrachtung der Leuchte hielten 11 Probanden die Leuchte für eine Gasaufsatzleuchte. Im Mittel bewertete die Stichprobe die Leuchte trotz der Verwendung von LED-Technik als eher historisch im Aussehen und behaglich anmutend. Auffällig bei der Auswertung der qualitativ zu beantworteten Fragen war, dass es bezüglich der Bewertung der Gleichmäßigkeit der Beleuchtung kontroverse Ansichten gab. So wurde bei gleicher Darbietungssituation die Lichtverteilung von manchen Probanden als zu ungleichmäßig und von anderen als zu gleichmäßig bezeichnet. 6 von 27 Beobachtern fühlten sich geblendet. Dies lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass aufgrund der Auflage des historischen Aussehens keine Lichtlenkung oder Blendungsbegrenzung in die Leuchte integriert wurde.

4 Resümee und Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Energiesparmaßnahmen der Betreiber öffentlicher Beleuchtungsanlagen oftmals ein Unterschreiten der sicherheitsrelevanten DIN - Regelungen zur Folge haben. Dies konnte durch Messungen zu den aktuellen Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteverteilungen und Berechnungen zu den vorliegenden Objektkontrasten von vier verschiedenen öffentlichen Anlieger- und Nebenerschließungsstraßen nachgewiesen werden. Daraus ergibt sich die Forderung nach neuen innovativen Beleuchtungskonzepten, die über eine simple Reduzierung des Beleuchtungsniveaus durch Reduzierung der Lampen oder Lampenwattagen hinausgehen und trotz geringerem Beleuchtungsniveau Objektkontraste ermöglichen, die eine genügende Erkennbarkeitsentfernung gewährleisten.

Solch ein innovatives Beleuchtungskonzept wird für eine Gasaufsatzleuchte realisiert. Grundlage für die Weiterentwicklung innovativer Beleuchtungskonzepte wie dieses LED-Substitutes für die Gasaufsatzleuchte ist eine positive Haltung der Bevölkerung gegenüber der Veränderung durch neue Leuchteninstallationen. Mit Hilfe der durchgeführten Akzeptanzstudie wurde herausgefunden, dass grundsätzlich keine abwehrende Haltung gegenüber neuen innovativen Lichttechniken besteht. Jedoch ist diese Aussage mit der Annahme verbunden, dass das bestehende Stadtbild nicht verändert wird.

5 Ausblick

Die durchgeführte Untersuchung zeigt, dass eine Bewertung von Beleuchtungsszenen mit ortsfester Straßenbeleuchtung von Anlieger- und Nebenerschließungsstraßen sinnvoll um das Kriterium des Objekt- und Objektschwellenkontrastes ergänzt werden kann. Zu untersuchen ist jedoch, um wie viel präziser die Aussagen über die Erkennbarkeit werden, wenn eine ausgiebige Berücksichtigung der Blendung erfolgt.

Weiter ist zu betrachten, ob geringfügige Unterschreitungen bei gleichzeitiger Verbesserung der Gesamt- und Längsgleichmäßigkeit die Sichtbedingungen der betrachteten Straßenkategorien beeinflussen.

6 Quellen

- [1] Licht.Wissen, Heft 3, Straßen Wege und Plätze, Fördergemeinschaft Gutes Licht, Stresemannallee 19, 60596 Frankfurt am Main, 2007
- [2] Private Mitteilung, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, Wolfgang Kollotschek 2009
- [3] Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: DIN 5044 - 1: Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung, Beleuchtung von Straßen für den Kraftfahrzeugverkehr, allgemeine Gütemerkmale und Richtwerte. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1981.
- [4] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin: Straßenausbaubeitragsgesetz (StrABG) vom 16. März 2006 (GVBl. S. 265), Online im Internet: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/service/gesetzestexte/de/download/baue n/20060316_strabg.pdf. 30.06.2009.
- [5] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin: Ausführungsvorschriften zum Straßenausbaubeitragsgesetz (AV StrABG), Berlin: 2009.
- [6] Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: DIN 13201 - 1: Straßenbeleuchtung. Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen; Deutsche Fassung CEN/TR 13201-1:2004. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [7] Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: DIN EN 13201 - 3: Straßenbeleuchtung. Teil 3: Berechnung der Gütemerkmale; Deutsche Fassung EN 13201-3:2003. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [8] Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin: DIN EN 13201-4: Straßenbeleuchtung. Teil 4: Methoden zur Messung der Gütemerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13201-4:2003. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2007.
- [9] Vos J.J. Reflections on Glare, Lighting Research and Technology, 35,2 (2003) pp 163-176
- [10] Kokoschka, S.; Gall, D.: FASIVAL, Entwicklung und Validierung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrersichtweite, 2000.