

# Objektdetektion bei verschiedenen Adaptationsspektren und Störgrößen unter mesopischen Bedingungen

A. Ueberschaer, Ch. Schierz

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik

Prof.-Schmidt-Str. 26, 98693 Ilmenau

Die in diesem Beitrag vorgestellte LED-Pilotleuchte wurde im Rahmen des Thüringer Verbundprojekts *CoLight* (Akronym für: **C**orporate in **L**ighting) entwickelt. Das Projekt *CoLight* wurde durch die Thüringer Aufbaubank (TAB) und den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert.

## 1. Problemstellung

In der Planungspraxis werden Straßenbeleuchtungssysteme anhand des zu erzielenden mittleren Leuchtdichteniveaus ausgelegt. Diese sind in DIN EN 13201-2 vorgegeben und legen folglich - zusammen mit Homogenitätsanforderungen - den minimalen Lichtstrom der zu verwendenden Leuchte fest /1/. Für das Lichtspektrum respektive die Lichtfarbe existieren hingegen keine eindeutigen Kenngrößen, die normativ bzw. in Empfehlungen geregelt sind. Qualitativ werden die Merkmale Lichtfarbe und Farbwiedergabe zwar erwähnt und ihnen neben einer ästhetischen Bedeutung auch ein Einfluss auf Sehleistung und Wohlbefinden beigemessen /1/, /2/, /3/, /4/, /5/, /6/, /7/, /8/. Praktisch lassen sich diese Angaben jedoch nicht definiert umsetzen, da sie einen weiten Auslegungsspielraum haben. Zudem wird die Lichtfarbe durch das Lichterzeugungsprinzip des verwendeten Leuchtmittels bedingt, wodurch die Farbauswahl stark eingeschränkt wird. Insbesondere dann, wenn nicht die gestalterischen sondern die energetischen Kriterien als Entscheidungskriterium herangezogen werden.

Auch die Einflüsse erschwelter Sehbedingungen auf die Wahrnehmung in Abhängigkeit des Spektrums werden in der Straßenbeleuchtung nicht berücksichtigt, obwohl das von Niederschlag reflektierte Licht die Sichtbarkeit beeinträchtigt. Die Reflexionen können zu einer Verschleierung des Sichtfeldes und somit zur Herabsetzung von Sehleistung und Sehkomfort führen. /9/, /10/

Das visuelle Wahrnehmungssystem des Menschen passt sich an seine vorherrschenden Umgebungsbedingungen an. Dieser Prozess wird Adaptation genannt. Ein hinsichtlich der Lichtfarbe verändertes Umfeld löst einen Adaptationsprozess – eine Farbumstimmung – aus. Es ist bekannt, dass gesättigte Lichtquellen gleicher Leuchtdichte unterschiedliche Helligkeiten hervorrufen (Helmholtz-Kohlrausch-Effekt) und die Lichtfarbe einen Einfluss auf die Leistung und das subjektive Empfinden (Gefallen) der Probanden hat /11/. Weitere Studien konnten zeigen, dass sich das Lichtspektrum unter mesopischen Bedingungen auf die visuelle Wahrnehmung auswirkt. So werden Objekte, die weiter von der Sechachse entfernt liegen (Peripherie) unter kurzwelligem Licht besser erkannt. /12/, /13/

Gleichwohl wird dem spektralen Einfluss auf die visuelle Wahrnehmung in der Praxis bisher wenig Bedeutung beigemessen, was mitunter auch dem Umstand geschuldet ist, dass der spektrale Variationsumfang konventioneller Leuchten äußerst gering ist. Mit der LED lässt sich eine Vielzahl an Lichtspektren erzeugen, sowohl durch die Variation des Leuchtstoffs, um verschiedene ähnlichste Farbtemperaturen zu erzielen, als auch durch die Variation elektronischer Parameter bei Multi-Chip-Anwendungen, deren Ausgangsspektrum sich additiv aus den Einzelspektren der Primärvalenzen ergibt. Dabei wird insbesondere bei Multi-Chip-Anwendungen mit großem Gamut das Lichtspektrum respektive die Lichtfarbe zu einem eigenständigen Parameter, den es zu bewerten gilt.

## 2. Zielsetzung

Ein Ziel des Projekts CoLight ist die Entwicklung einer intelligenten LED-Straßenleuchte, welche ihre farbmetrischen Parameter über eine elektronische Steuerung im laufenden Betrieb an die vorherrschende Verkehrsdichte und Witterungsbedingung anpassen kann. In Labor- und Feldstudien werden die Einflüsse des Spektrums auf Sehleistung und Sehkomfort empirisch untersucht, um hieraus Parameter für den Steueralgorithmus abzuleiten.

Ein weiteres Ziel war die Veränderung der Abstrahlcharakteristik (LVK) der Leuchte im laufenden Betrieb, um die Sichtbarkeit unter Schlechtwetterbedingungen zu verbessern. An dieser Stelle sei auf /22/ verwiesen.

## 3. Stand der Wissenschaft und Technik

### 3.1. Forschung

Nach Lachenmayr /15/ erfolgt der nächtliche Straßenverkehr überwiegend im Bereich des mesopischen Sehens. Studien zeigen, dass die visuelle Leistung unter mesopischen Bedingungen vom Spektrum der Lichtquelle beeinflusst wird, wobei die Höhe dieses Einflusses abhängig ist von der jeweiligen Sehaufgabe /21/.

Van Creveld /11/ verfolgte den Ansatz, dass stark gesättigte Lichtquellen heller wahrgenommen werden als weißes Licht gleicher Leuchtdichte. In diesem Zusammenhang untersuchte er u.a. den Einfluss der Lichtfarbe auf die Sichtbarkeit (Visibility). Er kam zu dem Ergebnis, dass kurzwelligeres Licht zu einer schlechteren Sehleistung führt. Hingegen ist das subjektive Empfinden (Gefallen) der Lichtfarbe unabhängig von der individuellen Leistung der Probanden.

Bullough und Rea /13/ befassten sich mit der Fahrleistung von Probanden bei Durchführung einer simulierten Fahraufgabe mit peripheren Reizen unter mesopischen und niedrig photopischen Bedingungen bei verschiedenen Spektren. Es zeigte sich, dass der Einfluss des Spektrums höher als erwartet war und den Einfluss des Beleuchtungsniveaus überstieg. Darauf basierend schlagen sie vor, die Parameter „off-axis Sichtbarkeit“, „on-axis Sichtbarkeit“ und „Farbwiedergabe“ zukünftig für die Planungspraxis zu verwenden.

In einer weiteren Studie untersuchen Bullough und Rea /10/ die Einflüsse von Regen und Schnee, die sich aufgrund der größeren Partikeldurchmesser in einem visuellen Rauschen äußern, welches sich über das Sichtfeld legt. Generell führt das durch Niederschlag reflektierte Licht zu Abschattungen der Straße oder von Objekten. Hierdurch wird der Objektkontrast reduziert und es kommt zu einer Herabsetzung der Sichtbarkeit. Bei visuellem Rauschen kommt es weiterhin zu Beeinträchtigungen im Sehfeld durch Flimmererscheinungen, die durch Reflexionen an den sich bewegenden Partikeln (Regentropfen, Schneeflocken) entstehen. Flimmernde Reize solch bewegter Objekte erscheinen heller als statische Objekte gleicher Leuchtdichte und können in Form von Blendung zu Unbehagen und Ermüdung führen. Unter mesopischen und niedrigen photopischen Bedingungen konnte ein Bezug zwischen S/P-Ratio und Fahrleistung hergestellt werden.

Raynham /16/ kommt in seiner Studie zu dem Ergebnis, dass die Grundlagen der Straßenbeleuchtung weitere Untersuchungen benötigen, um besser auf die Bedürfnisse der Verkehrsteilnehmer eingehen zu können. Insbesondere für die Gesichtserkennung fordert er Lichtquellen mit hohen Farbwiedergabeindizes.

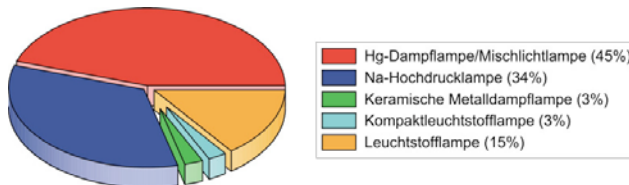
Auch die Studie von Fotios et. al. /12/ konnte den spektralen Einfluss auf die Helligkeitswahrnehmung zeigen, wobei der Einfluss des Spektrums auf die Sehleistung keinen eindeutigen Zusammenhang ergab. Es wurde zwischen fovealem und extrafovealem Sehen differenziert, wobei für erstes kein und für letzteres ein Einfluss des Spektrums auf die Sehschärfe und weitere visuelle Funktionen festgestellt wurde.

### 3.2. Technologie

Die Diskussionen um die LED sind hinreichend bekannt. Nicht selten werden die Vorteile von LED-basierten Beleuchtungssystemen unter dem Aspekt der Energieeffizienz diskutiert. Heutzutage entfallen etwa 20% der globalen elektrischen Energie auf die, über das elektrische Stromnetz betriebene Beleuchtung. Daran ist die Außenbeleuchtung mit einem Anteil von weniger als 2% beteiligt. /17/, /18/

Diese energetische Bilanz zeigt die verhältnismäßig geringe Beteiligung der Außenbeleuchtung am globalen Energiebedarf für Beleuchtungszwecke. Es ist daher nicht ausreichend, die Bewertung von Beleuchtungssystemen auf deren energetische Parameter zu reduzieren /19/. Vielmehr ist ein umfassendes Bewertungsmodell für Beleuchtungssysteme anzuwenden, dass neben der technologischen und wirtschaftlichen Sichtweise auch physiologische und psychologische Komponenten berücksichtigt /17/. Zu wenig oder falsch eingesetztes Licht kann zu unterschiedlichen negativen Auswirkungen führen (hierzu zählen u.a. Sehbeschwerden aufgrund schlechter Beleuchtung, zusätzlicher Lichtbedarf der immer älter werdenden Bevölkerung, Schlafstörungen) und erzeugt dadurch soziale und volkswirtschaftliche Kosten. An dieser Stelle findet der Begriff Lichtqualität seine Berechtigung, der visuelle, energetische, ästhetische sowie ökologische Aspekte vereint und zusätzlich auch biologische Lichtwirkungen berücksichtigt /20/.

Rund ein Drittel der Straßenbeleuchtung in Deutschland ist älter als 20 Jahre und nur etwa 3% werden jährlich erneuert. Ineffiziente Leuchtmitteltechnologien, schlechte Reflektoren und veraltete Leuchten, deren schlechter Wirkungsgrad sich in unnötig hohen Energiekosten und klimawirksamen Emissionen niederschlägt, sind keine Seltenheit. /21/



**Abb. 1:** Anteile verschiedener Lampentechnologien in der Straßenbeleuchtung in Deutschland 2006 (in Anlehnung an /17/).

Die in Abbildung Abb. 1 dargestellte Übersicht zeigt die Anteile verschiedener Lampentechnologien in der Straßenbeleuchtung in Deutschland. Die Quecksilberdampflampe ist mit einer Beteiligung von 45% am stärksten vertreten. Gemäß des Stufenplans der EU dürfen Leuchtmittel dieser Art ab 2011 mit einer Übergangsfrist bis 2015 nicht mehr in den Handel gebracht werden. Wie stark sich die hierdurch frei werdenden Marktanteile bezüglich der Natriumdampfhochdrucklampe und der Metallampflampe sowie der LED-Technologie in naher Zukunft ändern werden, bleibt abzuwarten.

Zur Erreichung hoher Systemeffizienzen sind die Vorteile der LED-Technologie, wie etwa Dimmbarkeit, hohe Lebensdauer, spektrale Variation und gerichtete Lichtabstrahlung ge-

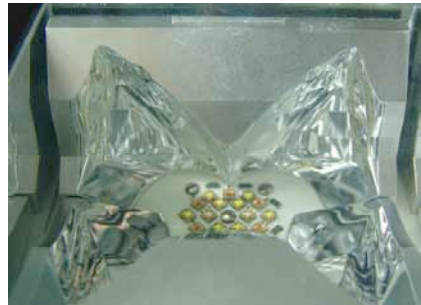
zielt zu nutzen. Hierzu genügt es nicht, die konventionellen Leuchtmittel bestehender Beleuchtungssysteme durch leistungstechnisch äquivalente LED-Module zu substituieren. Indes sind die einzelnen Komponenten des Gesamtsystems aufeinander abzustimmen und an die Betriebsparameter der LED anzupassen. Beispielhaft seien an dieser Stelle die Entwicklung neuer Optiken, die Bereitstellung eines Wärmemanagements sowie die Einbindung einer Ansteuerungselektronik mit Kommunikationsschnittstellen zu Sensorik und externen Steuerungen genannt.

#### 4. Entwicklung einer LED-Pilotleuchte

Zur Verwirklichung der in Abschnitt 2 genannten Ziele wurde von den Projektpartnern<sup>1</sup> eine LED-Pilotleuchte (Abb. 2) entwickelt. Technisch handelt es sich um ein modulares Leuchtenkonzept, das in der derzeitigen höchsten Ausbaustufe einen maximalen Lichtstrom von 24000lm erzielt und aufgrund dieser Leistung bei Mastabständen von bis zu 40m für ME3 Klassen geeignet ist.



**Abb. 2:** CoLight Pilotleuchte - Leuchtenkopf mit Blick auf die Lightengine (LED-Kassette)  
[Foto: Jenoptik Polymer Systems GmbH]



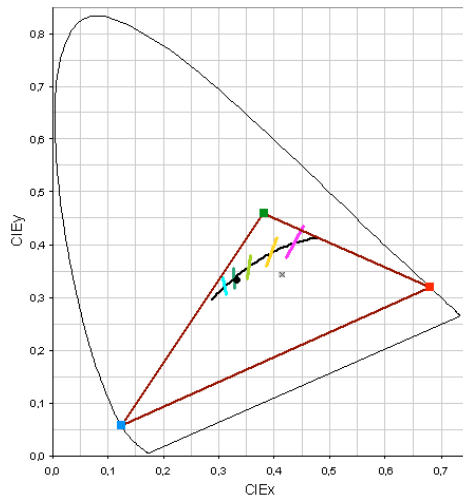
**Abb. 3:** CoLight Pilotleuchte - Detailsicht eines LED Clusters mit aufgesetzter Optik  
[Foto: Jenoptik Polymer Systems GmbH]

Um verschiedene Mischspektren zu erreichen, wurde für die Konzeptleuchte ein LED-System bestehend aus drei Primärvalenzen vorgesehen. Die Auswahl geeigneter LEDs orientiert sich an Größe und Lage des zu erzielenden Farbgamuts. Spektrale Restriktionen waren aufgrund fehlender normativer Vorgaben (siehe Abschnitt 1) nicht zu beachten. Zusätzlich wurden bei der Auswahl die Kriterien Beleuchtungsqualität und Energieeffizienz berücksichtigt.

Bei den gewählten Primärvalenzen handelt es sich um eine Abwandlung des klassischen RGB-Systems. Der Farbgamut umschließt einen großen Bereich des Planck'schen Kurvenzuges (Abb. 4), so dass sich eine Vielzahl ähnlicher Farbtemperaturen generieren lassen. Durch das breit ausgefüllte Spektrum der zu erzielenden Mischfarben wird ein hohes Maß an Lichtqualität erzielt. Die Primärvalenzen werden zu sogenannten Clustern kombiniert (Abb. 3), wobei das quantitative Verhältnis der Primärvalenzen innerhalb eines Clusters durch die Größe des zu erzielenden Farbtemperaturbereiches und energetische Betrachtungen bestimmt wird. Je nach verwendeter Clusteranzahl lassen sich die normativen Leuchtdichtevorgaben für jede Straßenklasse erzielen.

<sup>1</sup> Zu den Projektpartnern im Verbundprojekt CoLight gehören: diltronics GmbH (Jena), Fraunhofer Institut für angewandte Optik und Feinmechanik IOF (Jena), Jenoptik Polymer Systems GmbH (Triptis), MAZet GmbH (Jena), 2K Moxa Lighting GmbH (Moxa), TU Ilmenau - Fachgebiet Lichttechnik (Ilmenau)

Die intelligente Lichtregelung flexibilisiert die sensorgesteuerte LED-Pilotleuchte nicht nur durch die Dimmbarkeit des Beleuchtungsniveaus, sondern auch durch die Umverteilung der Lichtverteilung je nach Wetterlage. Demnach werden Messgrößen wie der Verkehrsfluss, die Helligkeit des Umfeldes und der Nässegrad der Straße von der Sensorik erfasst und zu Steuerdaten verarbeitet.



**Abb. 4:** Darstellung der drei Primärvalenzen und des hierdurch aufgespannten Farbgamuts in der CIE-Normfarbtafel. Der schwarze Punkt repräsentiert den Weißpunkt, das Kreuz die Farbvalenz bei Vollaussteuerung der drei Farbkanäle. [TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik]

#### 4.1. Innovation

Zum gegenwärtigen Stand können konventionelle oder LED-betriebene Straßenleuchten im laufenden Betrieb lediglich den abgegebenen Lichtstrom und somit die Leuchtdichte auf der Straße anpassen. Diese Dynamik folgt in der Regel einer vorprogrammierten zeitlichen Sequenz.

Mit dem in diesem Beitrag beschriebenen Ansatz entstand eine innovative, weil erstmals im laufenden Betrieb zeitlich und örtlich sowie spektral adaptive Straßenleuchte. Das System kann eigenständig verschiedene Umgebungsbedingungen detektieren und in deren Abhängigkeit Helligkeit, Abstrahlverhalten sowie das Spektrum anpassen.

Gegenüber bisherigen Straßenbeleuchtungssystemen ermöglicht diese Konzeptstudie darüber hinaus die bewusste Anwendung von Lichtfarbe in der Straßenbeleuchtung unter Berücksichtigung sicherheitsrelevanter und psychologischer Aspekte.

### 5. Methodik

Kern der Untersuchungen bildet ein Laboraufbau (Abb. 5), mit dem Sehleistung und Sehkomfort einer Sehaufgabe erhoben und anschließend bewertet werden. Mit diesem Aufbau wurde ein Rahmen geschaffen, um neben normalen auch erschwerte Sehbedingungen reproduzierbar zu simulieren.

Der Proband adaptiert mit Hilfe eines Adaptationsfeldes auf ein zuvor festgelegtes Spektrum bei definierter Leuchtdichte, wobei für jede Kombination aus Adaptationsspektrum und -leuchtdichte jeweils eine Versuchsreihe vorgesehen ist. Die Variation des Adaptationsspektrums orientiert sich dabei an typischen Spektralverteilungen ortsfester Straßenbeleuchtungssysteme. In jeder Versuchsreihe wird dem Probanden für einen kurzen Zeitraum ein achromatisches, quaderförmiges Testzeichen unter verschiedenen Blickwinkeln und Leuchtdichten in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Aufgabe des Probanden ist jeweils die Detektion des Objektes, d.h. er gibt an, ob er das Objekt hat sehen können oder nicht. Als Besonderheit sind Versuchsreihen vorgesehen, die mit einer Störgröße überlagert werden. Ziel dieser Störgrößen ist, auch unter Laborbedingungen markante Einflüsse aus der Realität zu berücksichtigen. Hierzu wird einerseits eine Blendquelle verwendet. Andererseits werden erschwerte Sehbedingungen in Form von Regen erzeugt, die das Gesichtsfeld des Probanden mit einem Rauschen belegen.

Für die technische Umsetzung werden Projektoren verwendet, mit denen die Testzeichen auf einer hochwertigen und aselektiven Projektionswand dargestellt werden. Als Blendquellen werden CoLight LED-Module verwendet, für die eigens ein Gehäuse konstruiert wurde, mit dem das Licht gezielt in den Versuchsbereich eingekoppelt werden kann. Hierbei besteht die Möglichkeit, Form und Größe der Einkoppelstelle zu variieren. Ebenso variabel ist die Positionierung der Blendquellen im Gesichtsfeld des Probanden. Die Störgröße Regen wird durch eine Beregnungsanlage umgesetzt, die über zwei separate Wasserlinien verfügt, so dass zwei verschiedene Regenarten simuliert werden können. Die Dimension des Laborstandes ermöglicht einen nutzbaren Sehwinkelbereich von  $\pm 24^\circ$  bei nahezu fernakkommodiertem Auge.

Für den koordinierten Ablauf der Versuchsreihen sowie die synchrone Steuerung des Adaptationsfeldes, der Testzeichen und den Störgrößen „Regen“ und „Blendung“ wird eine globale Systeminfrastruktur auf Basis einer Mediensteuerung verwendet. Hiermit lassen sich die zeitkritischen Einblendungen des Testzeichens reproduzierbar realisieren. Vor dem Hintergrund einer höheren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie zur Vermeidung grober Fehler wurde ein teilautomatisierter Ablauf programmiert, wobei der Versuchsleiter eine begleitende Rolle übernimmt.



**Abb. 5:** Laborstand  
[Foto: TU Ilmenau, FG Lichttechnik]



**Abb. 6:** Teststraße in Ilmenau  
[Foto: TU Ilmenau, FG Lichttechnik]

Zur Validierung der im Labor erhobenen Daten werden ausgewählte Versuchsreihen unter realen Bedingungen auf einer Teststraße in Ilmenau (Abb. 6) nachgestellt. Hierzu werden Versuchsreihen bei verschiedenen konventionellen Lichtquellen und der CoLight LED-Pilotleuchte durchgeführt. Ein Probandenkollektiv bewertet die Erkennbarkeit von Sehzei-

chen, die im Bewertungsfeld positioniert werden. Aus den Ergebnissen werden Aussagen zur Sehleistung und zum Sehkomfort abgeleitet. Eine zusätzliche Befragung zur Lichtästhetik, d.h. dem persönlichen Gefallen der verschiedenen dargebotenen Lichtszenarien, rundet die Versuchsreihen im Feld ab, so dass abschließend aus den Ergebnissen zu Sehleistung, Sehkomfort und Gefallen ein ganzheitliches Akzeptanzurteil abgeleitet werden kann.

## **6. Ergebnisse**

Zum Redaktionsschluss dieses Tagungsbandes wurden die Messungen noch nicht abgeschlossen. Die Ergebnisse werden im Vortrag präsentiert.

## **7. Ausblick**

Ein wesentlicher Vorteil der Adaptivität der Parameter Lichtstrom, Lichtverteilung und Lichtfarbe im laufenden Betrieb ist, dass die Leuchte flexibel verwendet werden kann. Der Betreiber braucht daher zukünftig keine unterschiedlichen Leuchtenfamilien mehr zu unterhalten. Mit den genannten Steuerungsmöglichkeiten gehen auch energetische Vorteile und ein Sichtbarkeitsgewinn einher, da sich das Licht gezielt lenken lässt und der abgegebene Lichtstrom innerhalb eines Wartungsintervalls nahezu konstant gehalten und gedimmt werden kann. Die Flexibilität ermöglicht auch den Betrieb in einem sehr effizienten Modus (Stromspar-Modus).

Die Möglichkeit, verschiedene Lichtfarben individuell zu wählen und im Betrieb zu variieren kann zukünftig den Wunsch nach visueller Führung bestärken. So ließen sich beispielsweise Gefahrenbereiche wie Kreuzungen gezielt hervorheben. Da sich mit Lichtfarben auch Emotionen erzeugen lassen, können Stadtbereiche gezielt aufgewertet werden. Die bisher rein funktionale Bedeutung der Straßenbeleuchtung wird zukünftig durch gestalterische Funktionen bereichert. Hierbei sei allerdings darauf hingewiesen, dass die Straßenbeleuchtung selbst nicht als Architekturbeleuchtung zu verstehen ist und auch zukünftig nicht als solche verstanden werden wird, auch nicht dann, wenn Teile des emittierten Lichtes auf Gebäudefassaden fällt.

In erster Linie wird jedoch angestrebt, die Sehleistung und den Sehkomfort des Nutzers zu verbessern, um ein höheres Sicherheitsgefühl und eine verbesserte Verkehrssicherheit bei der nächtlichen Fortbewegung insbesondere auf nasser Straße zu erzielen. Dies erfolgt, indem wahrnehmungsspezifische Zusammenhänge zwischen Licht und Mensch in die Steuerungsalgorithmen einfließen.

Zusammenfassend wird mit der im Verbundprojekt CoLight entwickelten LED-Pilotleuchte erstmalig eine Straßenleuchte bereitgestellt, mit der etwaige Potentiale dynamisch-adaptiver Straßenbeleuchtungssysteme experimentell erforscht werden können. Neben dem in diesem Beitrag beschriebenen Einsatzgebiet auf der Teststraße in Ilmenau wird die Leuchte im Rahmen des Forschungsprojektes „Kommunen im neuen Licht“ auch erstmalig im öffentlichem Raum (Andreasstraße, Erfurt) installiert und erprobt.

## 8. Literatur

- /1/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Straßenbeleuchtung – Güteermkmale*. DIN EN 13201-2, Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- /2/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Straßenbeleuchtung – Auswahl der Beleuchtungsklassen*. DIN 13201-1, Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- /3/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Ortsfeste Verkehrsbeleuchtung*. DIN 5044-1, Berlin: Beuth Verlag, 1981.
- /4/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Empfehlungen für die Beleuchtung von Strassen für den Kraftfahrzeugverkehr*. CIE Publication 12.2, 1977.
- /5/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic*. CIE Publication 115, 1995.
- /6/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Guide to the lighting of urban areas*. CIE Publication 136, 2000.
- /7/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Fundamentals of the visual task of night driving*. CIE Publication 100, 1992.
- /8/ DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsplätze im Freien*. DIN EN 12464-2, Berlin: Beuth Verlag, 2007.
- /9/ COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE: *Equations for disability glare*. CIE Publication 146, 2002.
- /10/ BULLOUGH JD, REA MS: *Driving in snow: effect of headlamp color at mesopic and photopic light levels*. SAE Technical Paper Series No. 2001-01-0320. Society of Automotive Engineers, 2001.
- /11/ VAN CREVELD, K.: *An investigation into the relationship between luminance and brightness of strongly chromatic light sources*. Lighting Research and Technology (1999), 31(3): 117-122.
- /12/ FOTIOS S, CHEAL, C, BOYCE PR: *Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review*. Lighting Research and Technology (2005), 37(4): 271-294.
- /13/ BULLOUGH JD, REA MS: *Simulated driving performance and peripheral detection at mesopic and low photopic light levels*. Lighting Research and Technology (2000); 32(4): 194-198.
- /14/ ECKERT M: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Berlin, München: Verlag Technik, 1. Auflage 1993.
- /15/ LACHENMAYR BJ: *Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr*. Shaker Verlag, 1995. ISBN: 3-8265-0845-9
- /16/ RAYNHAM P: *An examination of the fundamentals of road lighting for pedestrians and drivers*. Lighting Research and Technology (2004) 36: 307.
- /17/ KHANH TQ, SPRUTE JH: *LED-Technologie für eine energieeffiziente und normgerechte Straßenbeleuchtung*. In: VDI-Berichte Nr.2059, 2008.
- /18/ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *Lights labours lost: Policies for energy-efficient lighting*. OECD/IEA, 2006.
- /19/ ECKERT M, MESEBERG H-H: *Straßenbeleuchtung und Sicherheit*. LiTG-Publikation Nr. 17. 1998.
- /20/ BIESKE K: *Über die Wahrnehmung von Lichtfarbenänderungen zur Entwicklung dynamischer Beleuchtungssysteme*. Dissertation, TU Ilmenau, 2010.
- /21/ BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Lichter aus für den Klimaschutz? 2007*.
- /22/ WALKLING A: *Schlechtwetter-optimierte LED-Straßenbeleuchtung zur Verbesserung der Sehsicherheit*. Tagungsband Licht 2012.