

# NEUE PLANUNGS- UND ENTWICKLUNGSVERFAHREN ZUR BESTIMMUNG ADAPTIVER LICHTVERTEILUNGEN IN DER LED-STRASSENBELEUCHTUNG

*Schade S.<sup>1</sup>, Steblau J.<sup>1</sup>, Lu Y. W.<sup>1</sup>, Scheibler S.<sup>1</sup>, Völker S.<sup>1</sup>*

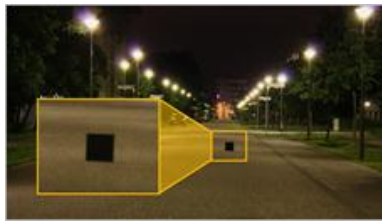
*<sup>1</sup> Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, Berlin, GERMANY,  
Sebastian.Schade@TU-Berlin.DE*

## 1 Einleitung

Mit der zunehmenden Etablierung der LED-Technologie im Bereich der Straßenbeleuchtung vollzieht sich auch ein Wandel in der Planung und Realisierung von Beleuchtungsanlagen. Die Verteilung des Lichtes auf Fahrbahn und Gehwegen kann aufgrund der verhältnismäßig kleinen Lichtaustrittsfläche bei LEDs mit entsprechenden Optiken oder Freiformreflektoren in einer Präzision erfolgen, die mit herkömmlichen Lichtquellen, zum Beispiel Entladungslampen, aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Lichtaustrittsfläche bisher so nicht möglich war. Lichtstärkeverteilungskörper (LVK), welche die vektorielle Verteilung der Lichtstärken im Raum beschreiben, können nahezu beliebig entsprechend individueller Anforderungen angepasst und geformt werden. Hierdurch prägte sich in der letzten Dekade der Leitgedanke, mit Hilfe der LED-Technologie in der Straßenbeleuchtung präzise dort zu beleuchten, wo es aus Sicht der Sicherheit und des Wohlempfindens relevant ist. Nach der Auffassung von Herstellern und Lichtplanern waren diese Bereiche exakt die nach der aktuellen Normung beschriebenen Bewertungsflächen für Fahrbahn und Gehwege (vgl. EN, 2004, 2007). So entstanden im Idealfall bei den Leuchtenherstellern LVK, welche exakt für eine spezifische geometrische Situation entwickelt wurden und für diese Installation die normativen Empfehlungen hinreichend erfüllten.

Doch dieser Schritt zur Perfektion der Lichtverteilung ist in der Praxis zum entscheidenden Nachteil der LED-Straßenleuchten geworden. Denn weicht die Installationsgeometrie auch nur wenige Meter von der Idealgeometrie ab, führt dies durch den LED bedingten harten Lichtabfall am Rand der zu beleuchteten Fläche zu starken Einbrüchen (zu großer Lichtpunktabstand) oder erhöhenden Überlappungen (zu geringer Lichtpunktabstand) des Beleuchtungsniveaus zwischen zwei Leuchten. Dadurch wird die Gleichmäßigkeit der

Beleuchtung in diesen Bereichen drastisch verringert, was dazu führen kann, dass der Nutzer der Straße kaum erkennen kann ob sich Objekte auf der Fahrbahn befinden. Abbildung 1 illustriert diesen Effekt, in dem sie die Beleuchtungssituation einer gut geplanten Neuinstallation einer Leuchtensanierung mit LED-Leuchten gegenüberstellt. Im Rahmen dieser Sanierung war ein, für die neuen Leuchten eigentlich erforderliches, Versetzen der Lichtpunkte nicht möglich, was zur Folge hatte, dass die Leuchten zwei Meter weiter auseinander standen als es für die neu installierte LED Leuchten ideal gewesen wäre.



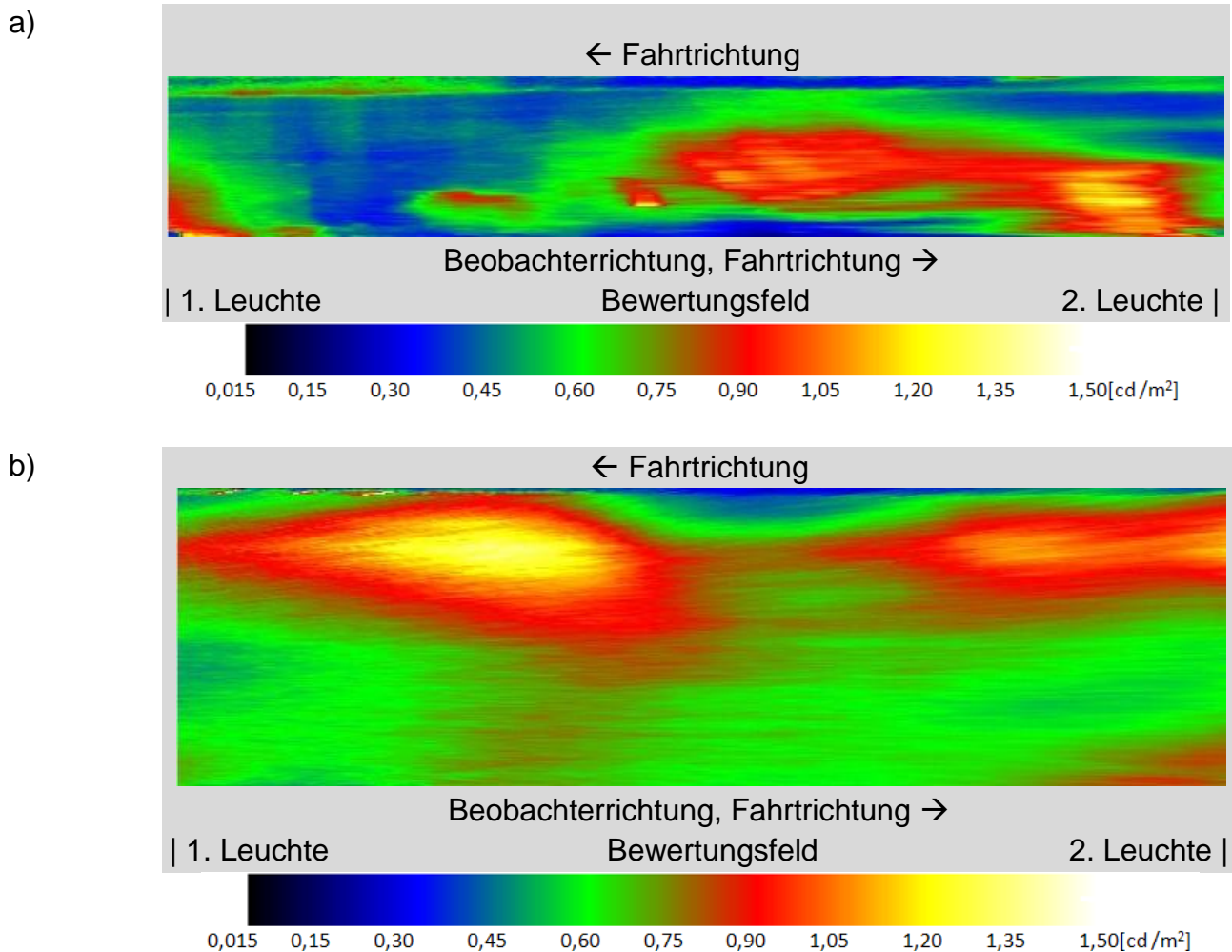
**Abbildung 1: Zwei Neben-erschließungsstraßen, welche beide die Anforderungen nach EN 13201 erfüllen, jedoch völlig unterschiedliche Objekt-erkennbarkeit aufweisen.**

Im Falle konventioneller Beleuchtungstechnologien hätte dieser vergrößerter Mastabstand aufgrund der fließenden Abnahme des Beleuchtungsniveaus am Rand der ausgeleuchteten Fläche zu einer leichten Verringerung des Niveaus und einer mäßigen Abnahme der Gleichmäßigkeit der Gesamtbeleuchtung geführt. Durch die Verwendung hoch spezialisierter LVK im Falle der LED Sanierung führte dies zu einem völlig unbeleuchteten und dadurch aus Sicht der Sicherheit hoch gefährlichen Bereich mittig zwischen zwei aufeinander folgenden Leuchten. Der eigentliche Vorteil der LED-Technologie konnte nicht genutzt werden. Mit einer individuell LVK-optimierten örtlich adaptiven Beleuchtungsanlage können solche Dimensionierungskonflikte allerdings vermieden werden.

## **2 Ziele**

Für einen objektiven Vergleich lassen sich die beiden Beispielsituationen aus Abbildung 1 als Leuchtdichteverteilungen aus der Vogelperspektive veranschaulichen. Abbildung zeigt die Leuchtdichteverteilung der Sanierung mit LED Technologie im Vergleich zur Neuinstallation mit konventionellen Leuchten innerhalb eines Messfeldes. Das Messfeld erstreckt sich zwischen zwei aufeinander folgenden Leuchten einer Fahrbahnseite über die gesamte Fahrbahn, aus Sicht eines Normbeobachters. Das unterschiedliche Verhältnis von Breite zu Länge der Leuchtdichteprojektion rührt daher, dass im Beispiel b) die Fahrbahn etwas breiter und der Lichtpunkt Abstand geringer ist als in Beispiel a).

Bei genauerer Betrachtung der beiden Fälle aus Abbildung 2 wird ersichtlich, dass der Einbruch der Leuchtdichte aus Beispiel a) durch das niedrige Beleuchtungsniveau zu einer stark verminderten Gleichmäßigkeit führt. Aus der Kombination von Bereichen mit sehr niedrigem Beleuchtungsniveau und schlechter Gleichmäßigkeit ergeben sich sehr schlechte Bedingungen für das Erkennen von Sehobjekten unter Beleuchtungsbedingungen wie in Beispiel a). Ziel der hier vorgestellten Untersuchung ist daher die Entwicklung eines Werkzeuges zur individuellen Anpassung von LVK auf definierte Beleuchtungssituationen.



**Abbildung 2: Leuchtdichteverteilung einer Straße mit niedriger Gleichmäßigkeit (a) und hoher Gleichmäßigkeit (b).**

Die diesem Werkzeug zugrunde liegenden Optimierungsverfahren orientieren sich an den Planungs- und Bewertungskriterien aktueller Normung, insbesondere denen der Europäischen Norm für Straßenbeleuchtung EN 13201 (EN, 2004, 2007) und der Nordamerikanischen Norm für Straßenbeleuchtung ANSI IESNA RP-8-00: 2005 (IESNA, 2005), folgend RP-8-00 abgekürzt.

Beide Normen geben Richtwerte für das Beleuchtungsniveau und die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung der Fahrbahn vor. Als lichttechnische Bewertungsgröße werden je nach Beleuchtungssituation die Leuchtdichte ( $L$  [ $\text{cd/m}^2$ ]) oder Beleuchtungsstärke ( $E$  [ $\text{lx}$ ]) herangezogen. Bei der Beleuchtungsstärke wird neben der horizontalen Messung ( $E_{\text{hor}}$ ) für bestimmte Bewertungen ebenso die vertikale Messung ( $E_{\text{ver}}$ ) verwendet. Darüber hinaus berücksichtigt der RP-8-00-Standard auch den erkennbarkeitsorientierten Bewertungsansatz „Small Target Visibility“ (STV), welcher auf einem gewichteten Mittelwert einer definierten Menge von Visibility Level (VL) Werten über den Verlauf eines Messfeldes auf der Fahrbahn basiert. Diese, dem RP-8-00 Standard zugrunde liegende Methode zur Beschreibung der Erkennbarkeit, baut auf der Definition von Blackwell im CIE Report 19.2.1:1981 (CIE, 1981; Adrian, 1989) auf:

$$VL = \frac{\Delta L_{\text{actual}}}{\Delta L_{\text{threshold}}} = \frac{L_o - L_o}{\Delta L_{\text{threshold}}}$$

Das  $VL$  gibt unmittelbar Auskunft über die Sichtverhältnisse einer Beleuchtungssituation, indem es die auf der Fahrbahn vorhandenen Leuchtdichteunterschiede  $\Delta L_{\text{actual}}$  eines dargebotenen Standard-Sehobjektes mit der aus wahrnehmungsphysiologischen Untersuchungen abgeleiteten notwendigen Leuchtdichteschwelle  $\Delta L_{\text{threshold}}$  für diese Situation in Beziehung setzt und so dokumentiert, wie gut ein Objekt in dieser Situation erkannt werden kann.  $\Delta L_{\text{actual}}$  resultiert dabei aus der Differenz der Leuchtdichte des Sehobjektes  $L_o$  und der Leuchtdichte des das Objekt umschließenden Untergrundes  $L_o$ .  $\Delta L_{\text{threshold}}$  beruht auf der Grundlage empirischer Forschung und beschreibt die Detektion des Objekts mit einer Wahrscheinlichkeit von nahezu 100% unter bestimmten Betrachtungsbedingungen (vgl. CIE, 1981; Adrian, 1989).

Mit diesen Methoden ergeben sich vier mögliche Optimierungsziele:

1. Eine optimale Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn
2. Eine optimale Verteilung der vertikalen Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn
3. Eine optimale Verteilung der Leuchtdichte auf der Fahrbahn
4. Ein optimales Visibility Level im Verlauf der Fahrbahn

Da die Optimierung für verschiedene Beleuchtungsklassen und Beleuchtungsniveaus anwendbar sein soll, und sich nur auf die Verteilung des Lichtes bezieht, wird für die ersten drei Optimierungsziele die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung auf der Fahrbahn herangezogen, bezogen auf die jeweilige Messgröße. Sowohl Längs- als auch

Gesamtgleichmäßigkeit sind unabhängig vom Beleuchtungsniveau bestimmenden Lichtstrom.

Die Optimierung des VL wird dahingehend optimiert, dass der gesamte Verlauf von VL-Werten im Verlauf der Fahrbahn optimal sein soll. Demnach gilt, dass der Betrag von VL für jeden Messpunkt  $1 \leq i \leq n$  in Interaktion mit den restlichen  $n - 1$  Messpunkten maximiert werden muss. Somit ergibt sich für die vier Optimierungsconstraints (Randbedingungen der Optimierung) explizit:

1.  $U_{0,E\ hor} \rightarrow \max$
2.  $U_{0,E\ ver} \rightarrow \max$
3.  $U_{0,L} \rightarrow \max$
4.  $|VL|_i \rightarrow \max$

### 3 Angrenzende Forschungen

#### 3.1 Planungs- und Bewertungskriterien

Aktuelle Standards, wie die CIE Publikation 115: 2010 (CIE, 2012) oder der nordamerikanische Standard für Straßenbeleuchtung ANSI IESNA RP-8-00:2005 (IESNA, 2005), verwenden zur Planung und Bewertung von Straßenbeleuchtungsanlagen hauptsächlich Beleuchtungsstärke- oder Leuchtdichtebasierte Methoden sowie das Visibility Level mit dem daraus errechneten gewichteten Mittelwert Small Target Visibility Level (STVL). Der Einfluss der Blendung wird übergreifend mit einer Limitierung des Blendindex TI (engl. threshold increment) begrenzt. Die Europäische Norm EN 13201 (EN, 2004, 2007) verzichtet auf einen VL orientierten Ansatz und beruft sich ausschließlich auf Minimal-, Maximal- und Mittelwerte für E und L sowie Mindestanforderungen an deren Gesamtgleichmäßigkeit  $U_0$  oder Längsgleichmäßigkeit  $U_1$ . Dies führt in der angewandten Planung von Straßenbeleuchtung zunehmend zu der Meinung, dass mit höherer Gleichmäßigkeit (Gesamt- oder Längsgleichmäßigkeit) auch eine bessere Erkennbarkeit von Objekten erreicht werden kann. Dass dies jedoch nicht zwingend der Fall ist, haben bereits Untersuchungen von Wassilev (1982) und Lecocq (1991) angedeutet. Sie konnten belegen, dass hohe Leuchtdichtegleichmäßigkeit ( $U_{0,L}$ ) einen positiven Einfluss auf die Erkennung von Sehobjekten hat. Eine Garantie für eine hohe Erkennbarkeit mittels hoher  $U_{0,L}$  konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Spätere Untersuchungen von Güler und Onaygil (2003) verglichen die Erkennbarkeit unter Variation der Gesamt- und

Längsgleichmäßigkeit innerhalb der Vorgaben für Leuchtdichteniveaus und Gleichmäßigkeit nach der CIE Publikation 115 (CIE, 2012). Die Ergebnisse zeigen, dass Straßen mit schlechten Leuchtdichtegleichmäßigkeiten häufiger Bereiche unzureichender Sehbedingungen anhand der VL-Bewertung aufweisen als Installationen mit guten Gleichmäßigkeiten oberhalb der normativen Mindestanforderungen (vgl. EN, 2004, 2007; IESNA, 2005). Der Umfang ihrer Untersuchungen beinhaltet jedoch nicht vollkommen oder nahezu vollkommen gleichmäßige Leuchtdichteverteilungen (vgl. Simpson, 2003), so dass der genaue Effekt einer Maximierung der Gleichmäßigkeit auf die Erkennbarkeit weiterhin offen bleibt. Es kann daher bisher lediglich davon ausgegangen werden, dass schlechte Gleichmäßigkeiten die Wahrscheinlichkeit unzureichend beleuchteter Fahrbahnbereiche und gefährlicher Objektkontrastumkehrungen erhöhen.

Offen bleibt auch, welchen Effekt eine definierte Ungleichmäßigkeit, die auf einer vorhergehenden Optimierung auf die Erkennbarkeit von Objekten nach der VL-Methode basiert, auf die Erkennung von Objekten hat. Denn der vielversprechende Ansatz, wie ihn ANSI IESNA RP 8 00:2005 (IESNA, 2005) bereits zur Bewertung von Straßenbeleuchtungsanlagen verwendet, hat auch seine Grenzen. So wird die Komplexität des Hintergrundes in der vereinfachten VL-Methode zur Bestimmung des Adaptationsniveaus kaum berücksichtigt. Es wird lediglich die Leuchtdichte der Fahrbahn als adaptationsbestimmende Leuchtdichte herangezogen. Vor allem für städtische Gebiete mit Wohnstraßen ist die visuelle Komplexität des Sichtfeldes höher als bei einfachen visuellen Bedingungen wie auf Autobahnen. Paulmier et al. (Paulmier et al., 2001) untersuchen diesen allgemeinen Ansatz für nicht-komplexe Szenen auf die Anwendbarkeit zur Erkennung von Fußgängern in visuell komplexen städtischen Gebieten. In der Studie wurden Hintergründe hoher visueller Komplexität in städtischen Gebieten mittels digitaler Bildverarbeitung analysiert und in computergenerierte abstrahierte Bilder unterschiedlicher Komplexität überführt. Die darauf aufbauenden Erkennbarkeitsversuche ergeben, dass für eine Detektionswahrscheinlichkeit von 90 Prozent in visuell komplexe Situationen ein VL von 10 als ausreichend angesehen werden kann. Für eine hohe Komplexität des Hintergrundes nahe dem Objekt ist ein VL von 25 für die gleiche Detektionswahrscheinlichkeit erforderlich. Um eine Wahrscheinlichkeit von nahezu 100 Prozent zu erreichen, wie es zur Berechnung von  $\Delta L_{threshold}$  in der CIE-Veröffentlichung Nr. 115:2010 (CIE, 2012) angewandt wird, wird in den Versuchen von Paulmier et. al. ein VL von 20 für niedrige Hintergrundkomplexität und 35 für hohe Komplexität benötigt. Eine weitere vielversprechende Studie zur Anwendbarkeit der Empfehlungen der VL-Konzept

Werte ist die Studie von Dijon (Dijon, 1998). Die Studie besteht aus einem Laborversuch, in welchem dargebotene Bilder mit definierten Objektkontrasten von Probanden bewertet werden, und einem Feldversuch auf einer Teststrecke um die VL-Bewertung nach ANSI IESNA RP-8-00: 2005 (IESNA, 2005) zu prüfen. Die Untersuchungen ergaben eine Beziehung der VL-Beträge und einem zuvor festgelegten Rating nach Tabelle 1.

*Tabelle 1: Zusammenhang zwischen VL und dem Probandenversuch nach Dijon (Dijon, 1998).*

<b> VL -Bereich</b>	<b>Rating</b>	<b>Bedeutung</b>
$0 <  VL  < 2$	0	target invisible
$2 <  VL  < 6$	1	target hardly visible, more of a guess than anything else
$6 <  VL  < 10$	2	target slightly visible, requires attention
$10 <  VL  < 14$	3	target visible, draws attention
$14 <  VL $	4	target perfectly visible

*Tabelle 2: STVL Vorgaben nach ANSI IESNA RP-8 00: 2005 (IESNA, 2005).*

Road and Pedestrian Conflict Area		STV Criteria	Luminance Criteria		
Road	Pedestrian Conflict Area	Weighting Average VL	$L_{avg,2}$ cd/m <sup>2</sup> Median <7.3 m	$L_{avg}^*$ cd/m <sup>2</sup> Median ≥7.3 m	Uniformity Ratio $L_{max}/L_{min}$ (Maximum Allowed)
Freeway "A"		3.2	0.5	0.4	6.0
Freeway "B"		2.6	0.4	0.3	6.0
Expressway		3.8	0.5	0.4	6.0
Major	High	4.9	1.0	0.8	6.0
	Medium	4.0	0.8	0.7	6.0
	Low	3.2	0.6	0.6	6.0
Collector	High	3.8	0.6	0.5	6.0
	Medium	3.2	0.5	0.4	6.0
	Low	2.7	0.4	0.4	6.0
Local	High	2.7	0.5	0.4	10.0
	Medium	2.2	0.4	0.3	10.0
	Low	1.6	0.3	0.3	10.0

Ausgehend von dieser Einordnung und von den Empfehlungen von Paulmier et. al. kann angenommen werden, dass die Vorgaben nach dem RP 800 Standard als absolute Mindestanforderungen gedeutet werden können und von einem weniger komplexen Hintergrund ausgehen. Dies gilt sowohl für einzelne VL-Werte als auch für die zusammenfassenden STVL Vorgaben nach ANSI IESNA RP-8 00: 2005 (IESNA, 2005) nach Tabelle 2.

Für einzelne VL-Werte gilt darüber hinaus grundsätzlich, dass Beträge kleiner als eins (egal, ob positiv oder negativ) zufolge haben, dass ein Sehobjekt unter dem Schwellenkontrast liegt und somit von einem Standardbeobachter mit einer Fixationszeit von 0,2 s nicht erkannt werden kann.

Die Diskussion der vier Optimierungsziele zeigt, welche der Planungs- und Bewertungsmethoden für eine sichere Fahrbahnausleuchtung herangezogen werden können. Jede der vorgestellten Methoden hat Vorzüge, allerdings auch ihre jeweiligen Grenzen.

### 3.2 Optimierung von Lichtstärkeverteilungskörpern

Erste Untersuchungen zur Optimierung von LVK führten unter anderem bereits Eberbach (Eberbach, 1973) und Enzmann (Enzmann, 1977) in den 1970er Jahren durch. Sie nutzten approximative Berechnungsverfahren mit linearen Gleichungssystemen, um LVK auf eine hohe Leuchtdichtegleichmäßigkeit hin zu optimieren. Bereits in diesen ersten Arbeiten zeichnete sich die Tendenz ab, die Erkennbarkeit von Standard-Sehobjekten als dominantes Kriterium für die Qualität der Beleuchtung heranzuziehen.

Zu Beginn der 1980er Jahre führte Wassilev (Wassilev, 1982) diese Wege fort und fokussierte sich vor allem auf die Verbesserung der Objektkontraste auf der Fahrbahn und das damit eng verbundene Visibility Level (VL) auf Basis des Modells von Adrian (Adrian 1969). Spätere Arbeiten (u. a. Di Fraia (Di Fraia, 1994)) orientierten sich weiter am „Visibility Concept“, welches auf Basis des aktuellen Standes der Forschung, wie in 3.1 beschrieben, auch im amerikanischen Standard für Straßenbeleuchtung ANSI IESNA RP-8-00 (IESNA, 2005) angewendet wird. Nach der Etablierung des VL-Ansatzes während der späten 1980er und '90er Jahre verwendeten die meisten Untersuchungen im Zusammenhang mit der LVK Optimierung das VL oder das STVL nach Kapitel 3 (vgl. IESNA, 2005) als Optimierungskriterien.

Zu Beginn der 1990er Jahre führten Leszczynska und Kurzawa (vgl. Leszczynska, Kurzawa, 1990). erste mathematische Optimierungen im Sinne der linearen Optimierung mit der Lichtstärke nach

$$\sum_{i=1}^n I_i \Rightarrow \min$$



als Zielfunktion durch. Als Randbedingungen wurden Mindestvorgaben für das Leuchtdichteniveau, die Gesamt- und Längsgleichmäßigkeit sowie den Objektkontrast eines Standardsehobjektes mit einem Reflexionsgrad von  $\rho = 20 \%$  definiert.

Da präzise Berechnungen mittels linearer Optimierung leicht zu einer großen Anzahl von Berechnungsvariablen und einer präzisen, jedoch rauen Form der LVK führen können, bevorzugten Pachamanov und Pachamanova (2008) den Weg einer nichtlinearen Optimierung. Bei diesem wird die Zielfunktion, in diesem Falle die Minimierung des Lichtstromes, mittels eines Polynoms folgender Form vorgeschlagen:

$$I(\gamma, C) = \sum_{r=0}^3 \sum_{s=0}^5 a_{r,s} \cdot C^r \cdot \gamma^s,$$

mit

- $a$       gesuchter Koeffizient,
- $r$       Laufvariable der Potenz für den C-Winkel,
- $s$       Laufvariable der Potenz für den  $\gamma$ -Winkel.

Diese Polynomschreibweise führt nach Pachamanov und Pachamanova zu einer Reduktion der Variablen und einer glatteren LVK. Die so errechnete Lösung ist jedoch nicht garantiert das gesuchte globale Extremum der Optimierung. Als beschränkende Randbedingungen werden die Gütevergaben für Straßen- und Tunnelbeleuchtung herangezogen (vgl. Pachamanov, Pachamanova, 2008). Dieser non-lineare Ansatz wurde daraufhin auch von Stefanov und Vassilev (Stefanov, Vassilev, 2009) aufgegriffen. Der Schwerpunkt liegt bei dieser Arbeit jedoch auf der Vergleichbarkeit zum Standard ANSI IESNA RP-8-00 und der darin angewandten Visibility Level Methode zur Bewertung der Erkennbarkeit standardisierter Sehobjekte.

Alle vorgestellten Verfahren zur Verbesserung der Homogenität der Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahn oder zur Minimierung des Lichtstroms erzielen gute Ergebnisse zur Verbesserung der Sichtbarkeit, bewertet anhand der Erkennbarkeit von Sehobjekten. Sie könnten sich somit auch über eine Optimierung der Leuchtdichtegleichmäßigkeit hinaus für andere Optimierungsziele oder Rahmenbedingungen, nämlich für eine Optimierung der konkurrierenden Optimierungsziele Effizienz und Sicherheit eignen.

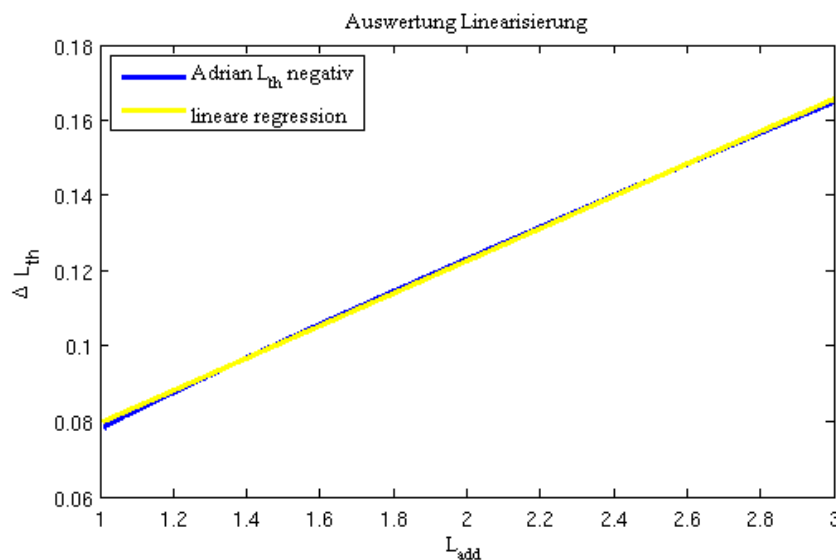
## **4 Optimierung der Lichtstärkeverteilungskörper**

Die Optimierung der Lichtstärkeverteilungskörper (LVK) erfolgt in der vorliegenden Studie mit einem eigens dafür entwickelten Optimierungstool. Dieses optimiert die LVK auf das

gewählte Optimierungskriterium, basierend auf dem Ansatz der linearen Optimierung. Als Entwicklungsumgebung diente die Software *Matlab*, Version 2010a inklusive *Global Optimization Toolbox* und *Optimization Toolbox*.

Die Verwendung linearer Optimierung hat bereits in der Arbeit von Leszczynska und Kurzawa (Leszczynska, Kurzawa, 1990) zur Optimierung von LVK gute Ergebnisse erzielt. Aufgrund der beschriebenen Vorzüge hinsichtlich der Variablen und LVK-Glätte wurden während der Entwicklung des Optimierungstools auch nichtlineare Optimierungsansätze und genetische Algorithmen getestet. Die im Gegensatz zur Untersuchung von Pachamanov und Pachamanova viel höhere Anzahl der im Bewertungsfeld verwendeten sehr fein gerasterten Messpunkte und den daraus entstehenden Variablen, kann unter Verwendung der nichtlinearen Optimierung jedoch zu sehr hohen Rechenanforderungen führen. Darüber hinaus ist es bei der nichtlinearen Optimierung nicht möglich, zuverlässig genug zwischen lokalen oder den erwünschten globalen Extrema unterscheiden zu können.

Da für die jeweilige Beleuchtungssituation und das verknüpfte Leuchtdichteniveau, für welche die jeweilige Optimierung durchgeführt wird, lediglich ein gewisser Leuchtdichtebereich relevant ist, kann die einzige nichtlineare Abhängigkeit, die Leuchtdichteunterschiedsschwelle, linearisiert werden. Die durch die die Linearisierung bedingten Abweichungen für den Schwellenkontrast  $C_{th}$  eines Standardbeobachters sind vernachlässigbar klein. Tabelle und Abbildung 3 demonstrieren dies exemplarisch.



**Abbildung 3: Beispiel zum Einfluss der Linearisierung auf die Werte des Schwellenkontrastes nach Adrian.**

Tabelle 3: Beispiele zur maximalen Abweichung der Linearisierung für  $C_{th}$ .

Exemplarisch ausgewählter Leuchtdichtebereich	Maximale Abweichung der linearisierten Werte zu den ursprünglichen $C_{th}$ -Werten
1,0 cd ... 5,0 cd	< 3,7 %
1,0 cd ... 3,0 cd	< 1,8 %
1,0 cd ... 2,0 cd	< 0,7 %

Berücksichtigt werden müssen jedoch die Unstetigkeiten der Funktion des Schwellenkontrastes an den Übergängen zwischen photopischen, mesopischen und skotopischen Sehens in diesen Leuchtdichtebereichen, bedingt durch die zugrunde liegenden Leuchtdichteadaptationsniveaus nach Adrian (1989).

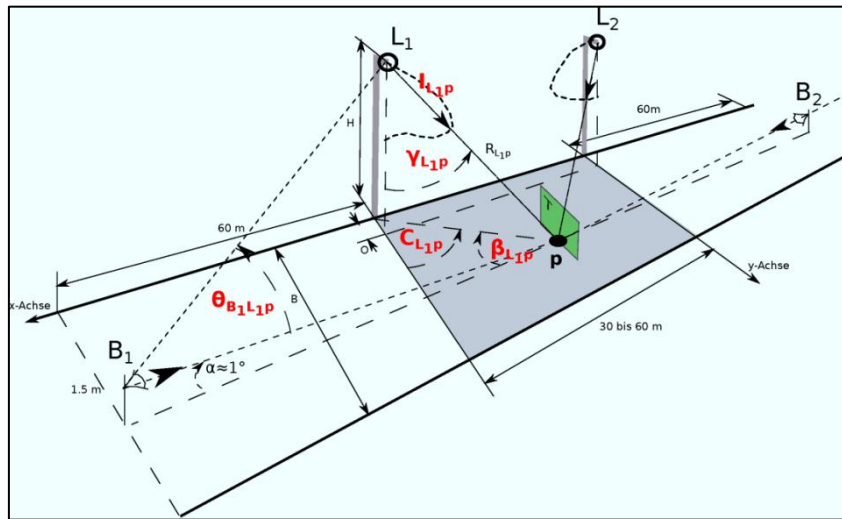


Abbildung 4: Beschreibung der Beleuchtungsszene.

Abbildung 4 beschreibt schematisch die geometrischen und lichttechnischen Beziehungen der allgemeinen Beleuchtungssituation. Innerhalb des grau unterlegten Messfeldes werden  $\hat{P}$  Messpunkte  $p$  gleichmäßig in dem von  $\hat{L}$  Leuchten mit gleicher LVK aufgespannten Fläche verteilt. Daraus resultiert, dass jeder Punkt  $p$  von  $\hat{L}$  Lichtstrahlen beleuchtet wird. Für die Minimierung des Lichtstroms einer Leuchte ergibt sich als grundlegendes Optimierungsziel, nach

$$\Phi = \sum_{p=1}^{\hat{P}} \sum_{l=1}^{\hat{L}} I_{p,l} \cdot d\Omega_{p,l};$$

wobei gilt

$I_{p,l}$  die dem Messpunkt  $p$  zugeordnete Lichtstärke von Leuchte  $l$ ,

und

$$d\Omega_{p,l} = \frac{dA_{p,l} \cdot \cos(\gamma_{p,l})}{R_{p,l}^2},$$

mit

- $dA_{p,l}$  Flächenabschnitt, den  $p$  als Messpunkt repräsentiert ,
- $\gamma_{p,l}$  Einfallswinkel des jeweiligen Lichtstrahls,
- $R_{p,l}^2$  Entfernung zwischen Messpunkt und Lichtquelle.

Die Minimierung des Lichtstromes konkurriert mit der Gewährleistung der Sicherheit für die entsprechend simulierte Beleuchtungssituation. Die Qualität der Beleuchtung und somit der Sicherheit wird gewährleistet durch ein angemessenes Beleuchtungsniveau und eine geforderte Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung der Fahrbahn. Dies wird durch das Setzen entsprechender spezifizierter Constraints berücksichtigt.

So wird eine Mindestgleichmäßigkeit der horizontalen Beleuchtungsstärke erreicht durch das Constraint

$$E_{hor,min} \leq E_{hor,opt,i} \leq E_{hor,max}$$

für alle Messpunkte  $i$  innerhalb des Bewertungsfeldes.  $E_{hor,min}$  entspricht dabei dem angestrebten minimalen Beleuchtungsniveau, das nicht unterschritten werden darf.

Im Falle einer konkurrierenden Optimierung auf eine maximale Gleichmäßigkeit der horizontalen Beleuchtungsstärke

$$U_{0,E\ hor} \rightarrow max$$

wird das Intervall  $E_{hor,max} - E_{hor,min}$ , innerhalb dessen die Optimierung vorgenommen wird, so klein gewählt, dass gerade noch eine Optimierung auf den minimalen Lichtstrom eine Lösung erhält. Entsprechend dieser Herangehensweise werden die Einschränkungen für die alternativen konkurrierenden Optimierungen  $U_{0,E\ ver} \rightarrow max$ ;  $U_{0,L} \rightarrow max$ ;  $|VL|_i \rightarrow max$  gesetzt.

Über diese Constraints hinaus können weitere Randparameter mit Hilfe des entwickelten User Interfaces aus Abbildung 5 gesetzt werden, um die gesamte Beleuchtungssituation präzise zu beschreiben. Zur Verfügung stehen:

- Geometrie
  - Lichtpunkthöhe (Masthöhe)
  - Länge des Bewertungsfeldes (Lichtpunktabstand)
  - Breite des Bewertungsfeldes (z. B. Fahrbahnbreite)
  - Position der Leuchte (Überhang)
  - Lichtpunktanordnung (Leuchtenanordnung) –noch in Entwicklung

- Straßendeckschicht (R-, C-, N-, W-Tabellen und individuell)
- Messraster
  - Auflösung der Berechnungspunkte (längs, quer)
  - Auflösung der Bewertungspunkte (längs, quer)
- Winkelauflösung der LVK (für .ldt-Format)

Über die manuelle Konfiguration hinaus, können LVK-Dateien im .ldt- und .ies-Format eingelesen und verarbeitet werden.

**Leuchtdichte (in cd/m<sup>2</sup>)**

	28.5 m	25.5 m	22.5 m	19.5 m	16.5 m	13.5 m	10.5 m	7.5 m	4.5 m	1.5 m
1 m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3 m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5 m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7 m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

**Bewertungsfeld:**

Leuchten Abstand: 30 [m]  
 Lichtpunkthöhe: 10 [m]  
 Bewertungsfeld Breite: 8 [m]  
 Lichtpunkteüberhang: 4 [m]  
 Bewertungspunkte längs: 10 [m]  
 Bewertungspunkte quer: 4 [m]  
 Bewertungspunkthöhe: 0 [m]

**Reflexionstafeln**

Standart R-Tables  
 C2  
 R-Tabelle verwenden

**Verteilungsparameter**

☒ Anwenden  
 max in X-Richtung: 1  
 min in X-Richtung: 1  
 min in Y-Richtung: 1  
 Verteilung berechnen

**Optimierung Limits**

Lichtstärkeunterschied in %: 90  
 Lichtstärkemaximalwert in lux: 20000  
 Leuchtdichteunterschied in %: 1000  
 Abstandsschrittweite x in %: 10  
 Abstandsschrittweite y in %: 10

Objektgröße in m: 0.2  
 Objekt R-Faktor in %: 20  
 VL minimum: -1

TI Maximalwert: 10  
 Werte übernehmen

**Gesamtlichtstrom [lm]:**

**Auswahl**

**Berechnung:**  
☒ LVK berechnen  
☐ LVK vorgeben

**Berechnungsgrundlage:**  
☐ Horizontale Beleuchtungsstärke  
☐ Vertikale Beleuchtungsstärke  
☐ Visibility Level  
☒ Leuchtdichte

**Leuchtenstandort:**  
☒ einseitig  
☐ versetzt  
☐ symmetrisch

**Beobachterstandort:**  
☒ standard  
☐ nein

**Berechnung der LVK**

Interpolationsintervalle:  
 dC: 2,0°  
 dGamma: 2,0°  
 PLOT  
☐ Schnittebenen

Abbildung 5: User-Interface des Optimierungsframeworks.

Da das übergeordnete Ziel der Optimierungen der Vergleich der vier in Kapitel 2 definierten Optimierungsziele  $U_{0,E\ hor} \rightarrow \max$ ,  $U_{0,E\ ver} \rightarrow \max$ ,  $U_{0,L} \rightarrow \max$  und  $|VL|_i \rightarrow \max$  ist, wird für die ersten drei Fälle innerhalb der im User Interface eingegebenen Minima und Maxima für die bestmögliche Gesamtgleichmäßigkeit gesucht. Gleichzeitig erfolgt auch im Rahmen dieser Arbeit die Minimierung des Gesamtlichtstroms der LVK, um das Beleuchtungsniveau nicht unnötig zu erhöhen und energieeffizient zu bleiben. Darüber hinaus wird entsprechend der aktuellen Standards EN 13201 und RP 800 die Blendung mittels Grenzwerte für den TI Faktor begrenzt. Das Ergebnis ist eine für die spezifische Situation, auf Basis des jeweiligen Bewertungskriteriums optimierte, LVK mit begrenzter Blendung und kleinstmöglichem Lichtstrom. Sie erfüllt die entsprechenden Rahmenbedingungen nach EN 13201 für die gewählte Beleuchtungssituation. Diese LVK werden folgend als Referenz-LVK bezeichnet. Für die einzelnen konkurrierenden

Optimierungsziele werden darüber hinaus Konventionen vereinbart, die für eine präzise und effiziente Optimierung relevant sind.

So werden für die Beleuchtung des Messfeldes nur zwei aufeinander folgende Leuchten herangezogen. Dies vermeidet zum einen hohe Lichtstärken, die nach dem photometrischen Entfernungsgesetz benötigt werden würden, wenn eine Leuchte Bereiche hinter der nächstfolgenden Leuchte beleuchten müsste. Zum anderen dient diese Konvention der Vermeidung von Blendung, welche durch die entsprechend flachen Beleuchtungswinkel und hohen benötigten Lichtstärken bei einer Beleuchtung über mehrere Messfelder hinaus resultieren würde. Die Optimierung auf eine maximale Gleichmäßigkeit erfolgt über die Gesamtgleichmäßigkeit. Eine ebenfalls hohe Längsgleichmäßigkeit resultiert jedoch daraus, dass als Beleuchtungsniveau für die Optimierung der Minimalwert der lichttechnischen Bewertungsgröße herangezogen wird. Das jeweilige Intervall, innerhalb dessen die Optimierung für jeden Messpunkt im Bewertungsfeld arbeitet liegt oberhalb dieses Grenzwertes. Da das Zielkriterium die Minimierung des Lichtstromes und somit der einzelnen Lichtstärken ist, nähert sich die Optimierung von oben an die vorgegebenen Minimalwerte der Messpunkte an. Dadurch resultiert gleichzeitig eine Maximierung der Längs- und der Gesamtgleichmäßigkeit. Ebenso erfolgt die VL-Optimierung und Bewertung in jedem einzelnen Messpunkt, so dass allgemeine Aussagen zur Sichtbarkeit unter der spezifischen Beleuchtungssituation getroffen werden können und nicht nur über eine bestimmte Linie mittig entlang eines Fahrstreifens. Diese Optimierung erfolgt angelehnt an ANSI IESNA RP-8-00 im Fix-Distance-Verfahren mit 60 m Beobachterabstand und 20 cm Kantenlänge des Sehobjektes. Dabei wird als adaptionsbestimmende Hintergrundleuchtdichte (vgl. Adrian, 1989) die mittlere Fahrbahnleuchtdichte herangezogen. Reflexionen von der Fahrbahn auf das Sehobjekt werden zum aktuellen Stand der Arbeit noch nicht berücksichtigt. Dies gilt auch für eine differenzierte Betrachtung des durch das Objekt selbst bedingten Schattenwurfes. Im Falle der direkten Optimierung auf das VL wird die zusätzliche Randbedingung eines Mindes-VL für jeden Messpunkt hinzugezogen.

Zwar ist es möglich, auch für das Optimierungskriterium  $U_{0,E\ hor} \rightarrow \max$  eine lineare Optimierung durchzuführen, doch kann unter der Berücksichtigung der Systemeffizienz angenommen werden, dass in diesem Fall eine Leuchte jeweils nur bis zur Mitte des Bewertungsfeldes ausleuchtet, da sonst wiederum unnötig hohe Lichtstärken zur Anwendung kommen würden. So würde jeder Messpunkt von nur einem Lichtstrahl

beleuchtet und eine analytische Lösung ist sowohl präziser als auch recheneffizienter als die lineare Optimierung. Die analytische Berechnung ist somit für diesen Fall vorzuziehen.

## 5 Vergleich der Optimierungsziele in der Simulation

### 5.1 Umfang der Simulationen

Die Simulationen werden mit einem, an der TU Berlin für Simulationen und Auswertung von Beleuchtungssituationen entwickelten Matlab-Framework durchgeführt. Dieses Framework greift auf ein Radiance-Framework zurück, welches die Ray-Tracing Aufgaben übernimmt und wertet ein von Radiance generiertes Leuchtdichtebild nach der VL-Bewertung entsprechend des ANSI IESNA RP-8-00 aus. Das Matlab Framework importiert Referenz-LVK und bindet sie in die entsprechende Beleuchtungssituation ein, für die sie optimiert wurde (vgl. Winter, 2012; Franke, 2012).

Im Rahmen der Simulationen gibt es zwei mögliche Herangehensweisen, die LVK auf die Erkennbarkeit hin auszuwerten. Im ersten Fall bleibt die Position des Standardbeobachters, angelehnt an ANSI IESNA RP-8-00 fix, mit einem festen Abstand von 60 m zur ersten Leuchte des Messfeldes nach Kapitel 3 und 4. Das Objekt nimmt die Positionen nach RP-8-00 über mindestens 10 Messpunkten entlang der mittleren Linie eines jeden Fahrstreifens an. In der Darstellung mehrerer Messpunkte als Graph entfernt sich das Sehobjekt sinnbildlich vom Beobachter. Erste Ergebnisse dieser Herangehensweise werden bereits in dieser Veröffentlichung vorgestellt.

Tabelle 4: Untersuchte Einflussparameter (unabhängige Variablen) und deren Variationsumfang.

<b>Einflussparameter</b>	<b>Variationsumfang</b>
Optimierungsziel	$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max, U_{0,E\ ver} \rightarrow \max, U_{0,L} \rightarrow \max,  VL _i \rightarrow \max$
Geometrie	Orientiert am Verhältnis von Lichtpunkthöhe $h$ zu Mastabstand $d$ : $d/h = 3$ ; $d/h = 4$ ; $d/h = 5^*$
Reflexionsgrad des Sehobjektes $\rho$	$\rho = 6,5\ %; 10\ %; 20\ %; 40\ %$
Typ der Straßendeckschicht	R- und C-Tabellen-Straßendeckschichten sowie die gemessene R-Tabelle eines Laborteppichs

**\*In den folgenden Beispielen gilt für das Verhältnis von Lichtpunkthöhe  $h$  zu Mastabstand  $d$ :  $d/h = 3$  entspricht 18 m;  $d/h = 4$  entspricht 24 m;  $d/h = 5$  entspricht 30 m.**

Die Simulationen umfassen über den Vergleich der vier in Kapitel 2 eingeführten Optimierungsconstraints  $U_{0,E\ hor} \rightarrow \max, U_{0,E\ ver} \rightarrow \max, U_{0,L} \rightarrow \max, |VL|_i \rightarrow \max$  hinaus auch Untersuchungen zum Einfluss der in Tabelle 4 dargestellten Einflussfaktoren.

Die Simulationen für die direkte Optimierung auf das VL werden ausschließlich für die Straßendeckschichttypen R2 und R3 durchgeführt. Die vollständigen Ergebnisse inklusive denen der zweiten Herangehensweise mit festen Abstand zwischen Beobachter und Sehobjekt, wie sie auch ursprünglich im RP-8-00 angewandt wird (vgl. IESNA, 2005), werden im Tagungsvortrag präsentiert.

## 5.2 Erste Ergebnisse der Simulationen

### Einfluss des Optimierungsziels nach Tabelle 4

Abbildung 6 bis Abbildung 9 zeigen die Verläufe des VL entlang des Bewertungsfeldes für Sehobjekte der Reflexionsgrade  $\rho = 6,5\%$ ;  $10\%$ ;  $20\%$  und  $40\%$  für einen Fahrbahndeckschichttyp der R2-Klasse. Abbildung 10 bis Abbildung 13 zeigen die gleichen Verläufe für einen Typen der R3-Klasse. Der linke Teil der jeweiligen Abbildung beschreibt den Verlauf der einzelnen VL-Werte unter Anwendung der Bewertung mit festem Beobachterstandpunkt. Die Auswahl der ausgewerteten Situationen spiegelt repräsentativ die ersten Ergebnisse des Vergleiches der Optimierungsvarianten wieder. Ergänzt wird die Darstellung der jeweiligen Variante durch Graphen mit einer Zusammenfassung jeweils aller Messwerte innerhalb des Messfeldes zu einem Boxplot. Das obere Whiskerende repräsentiert den maximalen VL-Wert, das untere den minimalen. Die Box mit dem als dicken Balken gekennzeichneten Median wird durch die Ober- und Untergrenzen der beiden inneren Perzentile abgeschlossen.

Der markanteste der in den einzelnen Abbildungen dargestellten VL-Verläufe ist die Optimierung auf eine homogene Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke. Eindeutig erkennbar ist, dass diese die mit Abstand größten VL-Beträge erzielt und somit für große Bereiche der Fahrbahn die besten Erkennbarkeitsbedingungen bereitstellt. Dies täuscht leicht über ein Problem dieses Optimierungsziels hinweg, dem Wechsel von negative auf positive VL und wieder zurück. Dieser Effekt wird allgemein als Kontrastumkehr bezeichnet, welche dazu führt, dass zwei Bereiche extrem niedrigen Visibility Levels entstehen. So wird im Falle einer homogenen Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke ein Objekt niedrigen Reflexionsgrades in der Regel in dem Beobachter näheren Teil des Messfeldes hinterleuchtet.



## Vergleich der VL-Verläufe für R2-Deckschicht

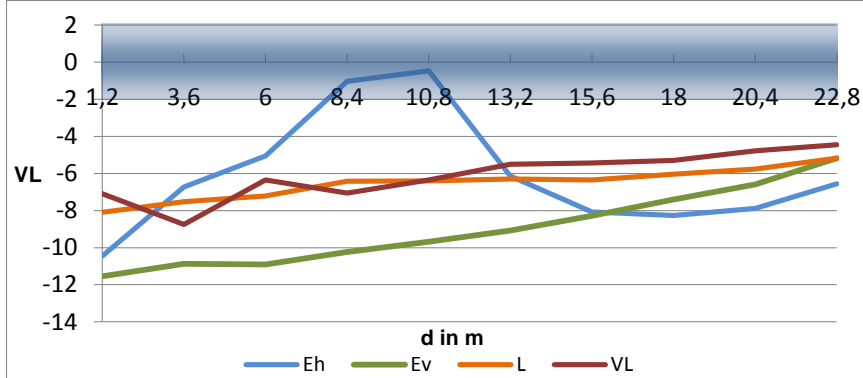


Abbildung 6: Visibility Level, 24m,  $\rho=6.5\%$ .

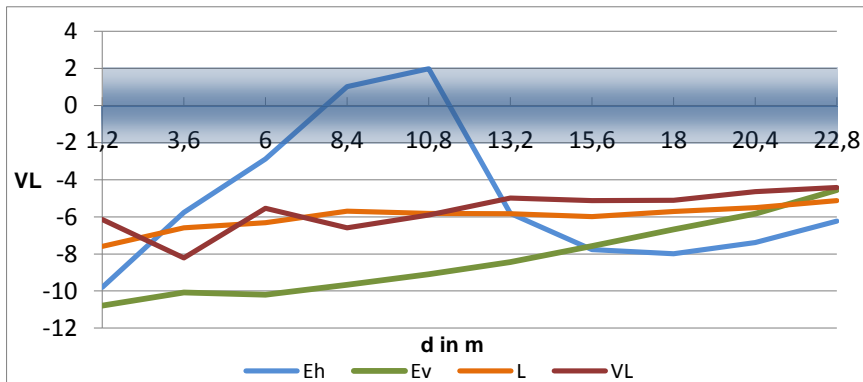
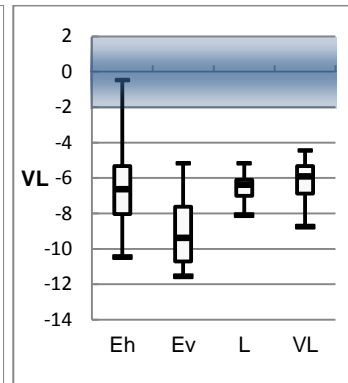


Abbildung 7: Visibility Level, 24m,  $\rho=10\%$ .

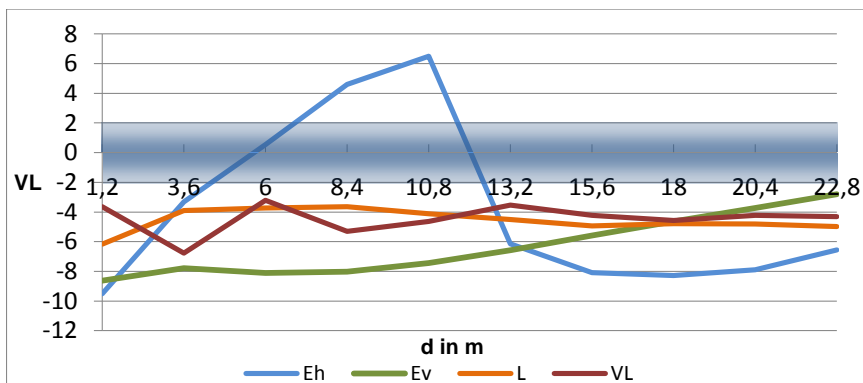
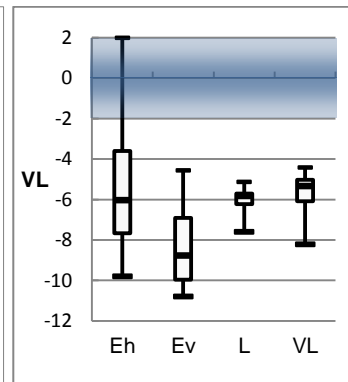


Abbildung 8: Visibility Level, 24m,  $\rho=20\%$ .

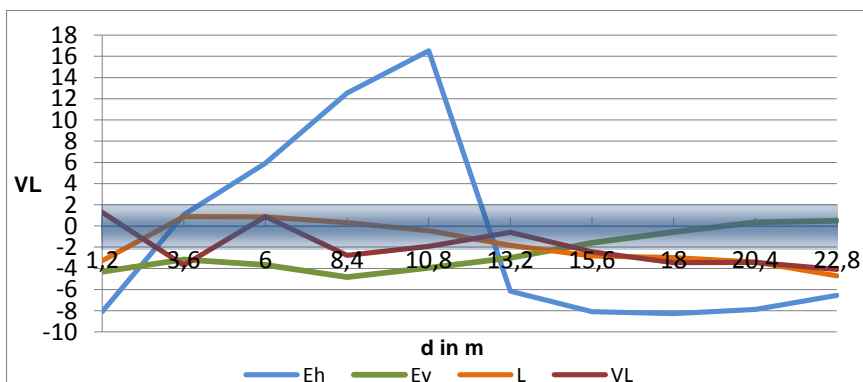
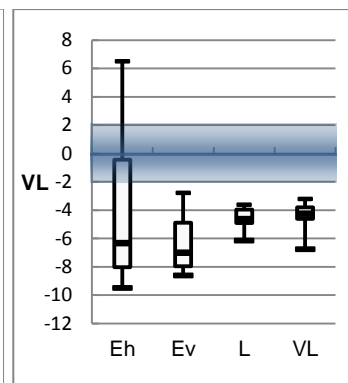
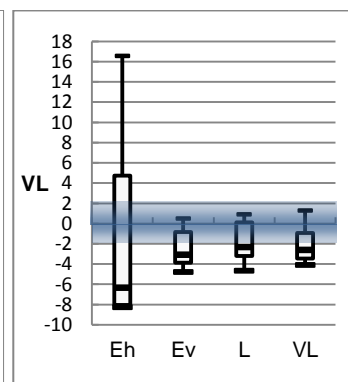


Abbildung 9: Visibility Level, 24m  $\rho=40\%$ .



## Vergleich der VL-Verläufe für R3-Deckschicht

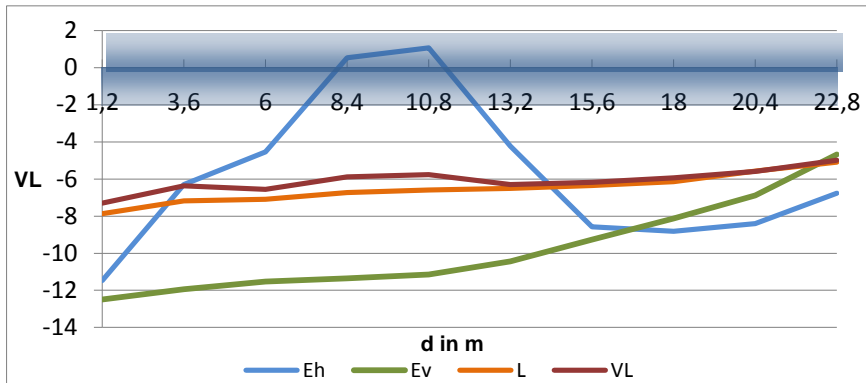


Abbildung 10: Visibility Level, 24m,  $p=6.5\%$ .

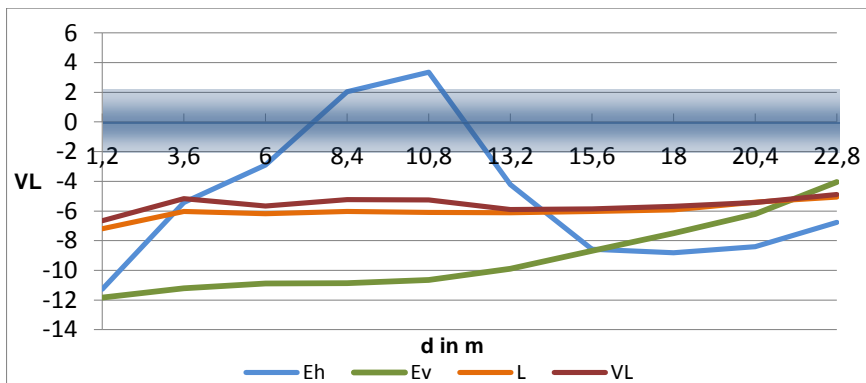
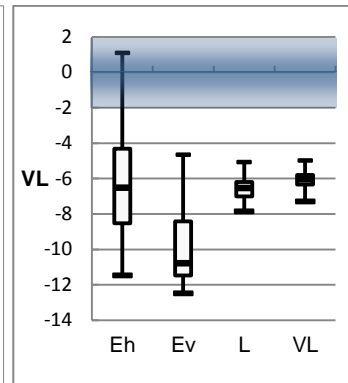


Abbildung 11: Visibility Level, 24m  $p=10\%$ .

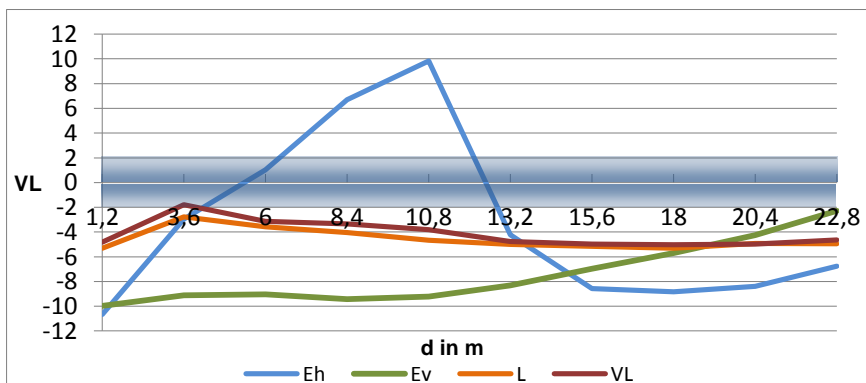
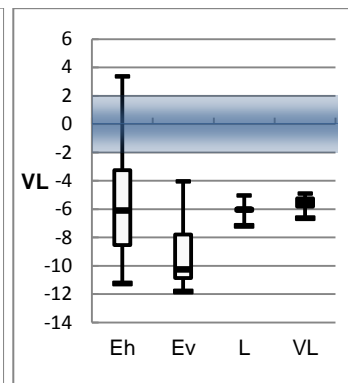


Abbildung 12: Visibility Level, 24m,  $p=20\%$ .

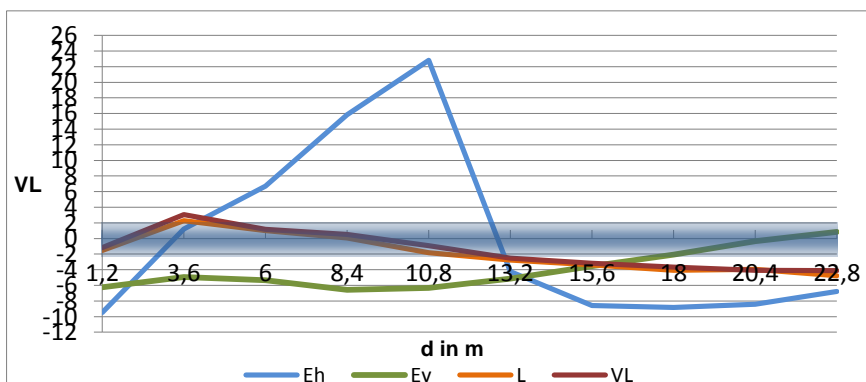
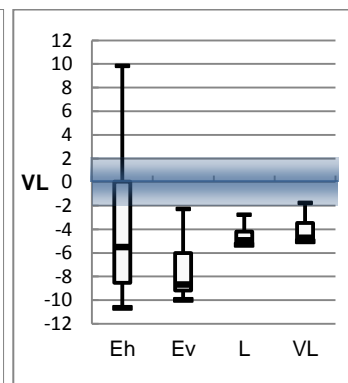
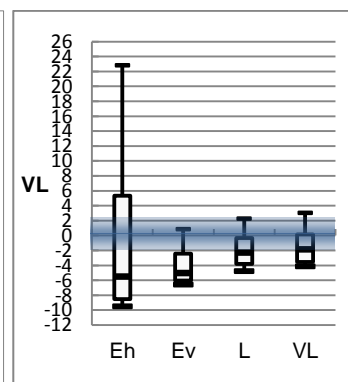


Abbildung 13: Visibility Level, 24m,  $p=40\%$ .



Entfernt sich das Objekt vom Beobachter, nimmt die anstrahlende Komponente des Lichtes zu, bis sie dem Anteil der hinteren Leuchte überwiegt, was zur ersten Kontrastumkehr führt. Dieser Effekt kehrt sich, eingehend mit einer zweiten Kontrastumkehr, im hinteren Teil des Messfeldes um. Vermieden wird dieser Effekt lediglich bei extrem niedrigen Sehobjektreflexionsgraden, wie in Abbildung 6 ersichtlich. Doch selbst in diesem Fall lassen sich größere Bereiche eines gefährlich niedrigem  $VL < 1$  nicht vermeiden. Eine Optimierung auf eine hohe Gleichmäßigkeit der horizontalen Beleuchtungsstärke, wie sie in der Praxis der Straßenbeleuchtung oft angestrebt wird, führt somit keinesfalls zu besten Sehergebnissen, sondern viel mehr zu weitläufigen Bereichen niedriger Erkennbarkeit.

Bessere Ergebnisse zeigen die Leuchtdichte- und VL-orientierte Optimierung. Über den gesamten Verlauf des Bewertungsfeldes zeigen sie sehr ähnliche Ergebnisse und nur unter extremen Geometrien mit hohem  $d/h$ -Verhältnis Kontrastumkehr. Je nach Situation bietet teils die VL-Optimierung bessere Werte, teils die  $U_{0,L} \rightarrow \max$ -Optimierung. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die VL-Optimierung primär eine  $U_{0,L} \rightarrow \max$ -Optimierung ist, welche jedoch um die zusätzliche Randbedingung eines Mindestbetrages für VL ergänzt wird. Dieser Mindest-VL wird innerhalb der VL-Optimierung Schritt für Schritt erhöht, bis keine Lösung mehr erzielt werden kann. Die letztmögliche Optimierung mit Ergebnis wird schließlich als Optimum angenommen.

Die im Vergleich besten Ergebnisse liefert meist die Optimierung auf eine hohe vertikale Beleuchtungsstärke. Ansatzbedingt kann das damit verbundene Gegenstrahlprinzip einer asymmetrischen Beleuchtung nur auf richtungsgebundenen Verkehr angewandt werden. Kritisch sind hier die Werte für den TI-Faktor zu betrachten, welche sich schnell negativ auf die Blendwirkung auswirken.

#### **Einfluss des Reflexionsgrades des Sehobjektes nach Tabelle 4**

Unabhängig von der Straßendeckschicht (bezogen auf R2 und R3) verschiebt sich bei  $U_{0,E \text{ hor}} \rightarrow \max$  mit steigendem Reflexionsgrad die VL-Kurve nach oben.

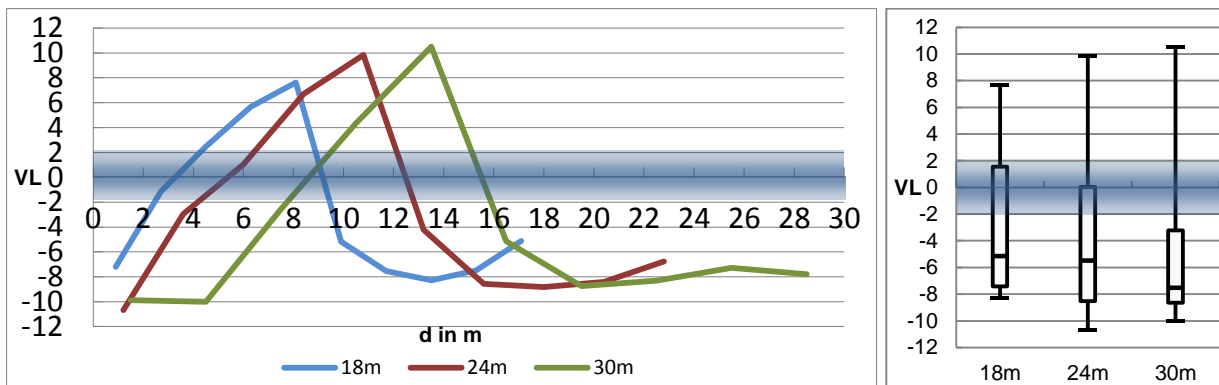


Abbildung 14: Visibility Level, Optimierung auf horizontale Beleuchtungsstärke, R3,  $\rho=20\%$ .

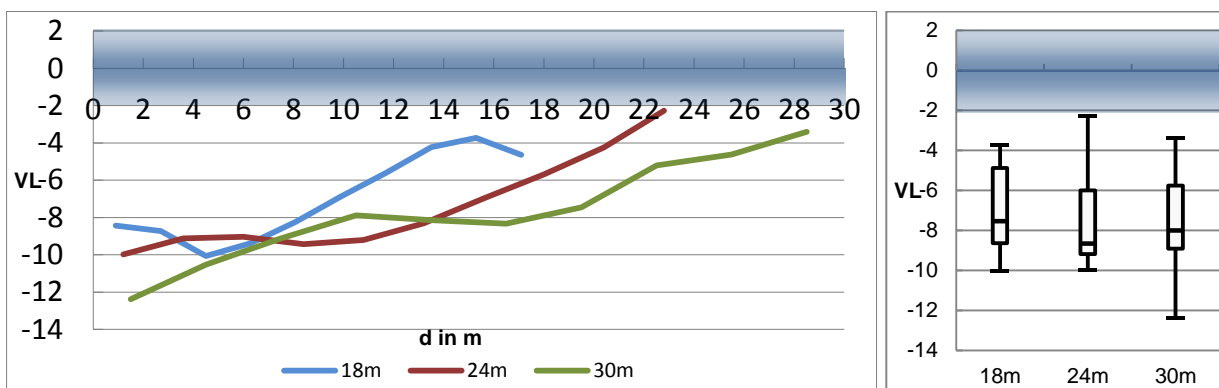


Abbildung 15: Visibility Level, Optimierung auf vertikale Beleuchtungsstärke, R3,  $\rho=20\%$ .

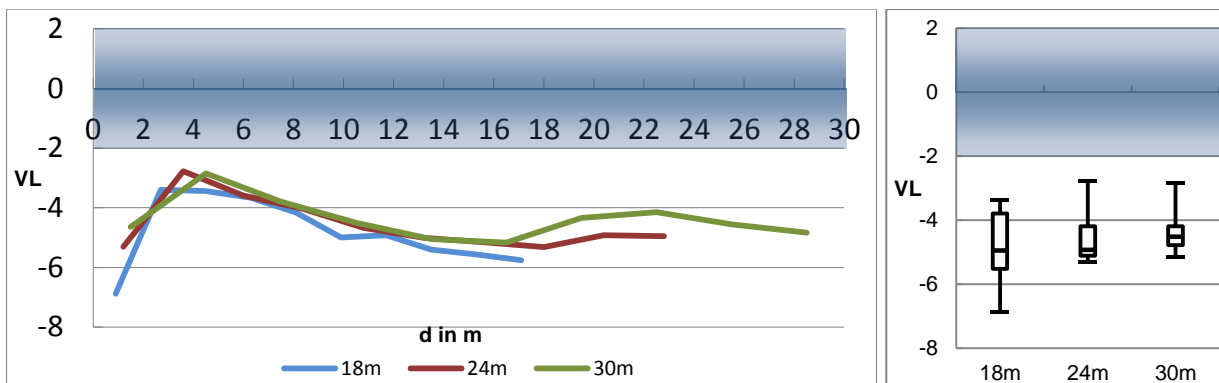


Abbildung 16: Visibility Level, Optimierung auf Leuchtdichte, R3,  $\rho=20\%$ .

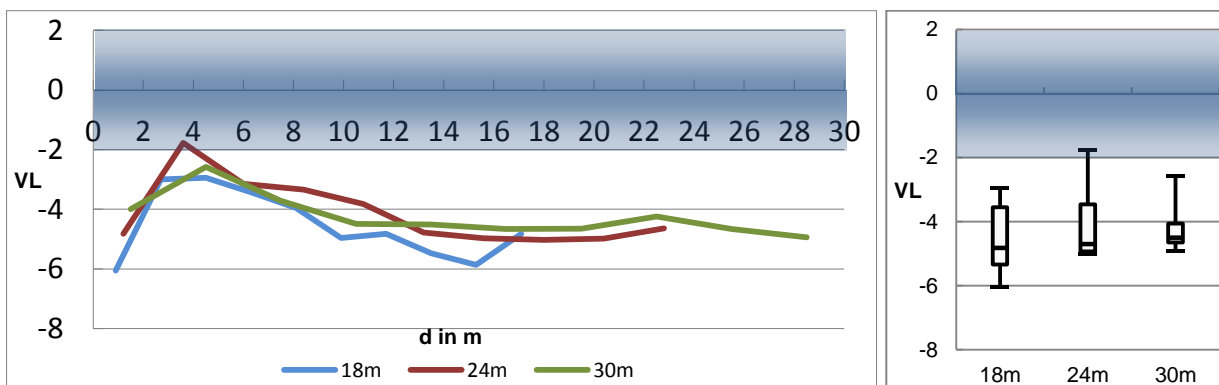


Abbildung 17: Visibility Level, Optimierung auf Visibility Level, R3,  $\rho=20\%$ .

Dies bedeutet bessere VL bei Positivkontrast und schlechtere VL bei Negativkontrast und ist darauf zurückzuführen, dass die objektanstrahlende Lichtkomponente bei größeren Objekten schneller wirkt als bei niedrigen Reflexionsgraden. Dieser Effekt ist bei R3-Deckschichten stärker ausgeprägt als bei R2-Typen und deutet darauf hin, dass ein eher spiegelnder Belag zu höheren Positivkontrasten und VL-Werten führt, als diffuse Materialien. Die Wahl des R-Typs schützt in den untersuchten Fällen jedoch nicht vor Kontrastumkehr.

Bei  $U_{0,E\ ver} \rightarrow \max$  verschlechtern sich die negativen Kontraste mit steigendem  $\rho$  des Sehobjektes ebenso, was zu einem schlechteren VL führt. Bei  $\rho = 40\%$  führt diese Verschiebung teilweise zu Positivkontrasten und somit zur Kontrastumkehr.

Der Effekt der Verschiebung der VL-Kurve nach oben fällt bei den Optimierungen auf  $U_{0,L} \rightarrow \max$ ,  $|VL|_i \rightarrow \max$  wesentlich schwächer aus, da bei ihnen der Reflexionsgrad des Objektes direkt in der Berechnung der LVK berücksichtigt wird.

Problematisch ist jedoch für alle Optimierungsvarianten der Reflexionsgrad  $\rho = 40\%$ . Hier stoßen alle Optimierungsansätze an ihre Grenzen, wenn es darum geht, Kontrastumkehrungen zu vermeiden.

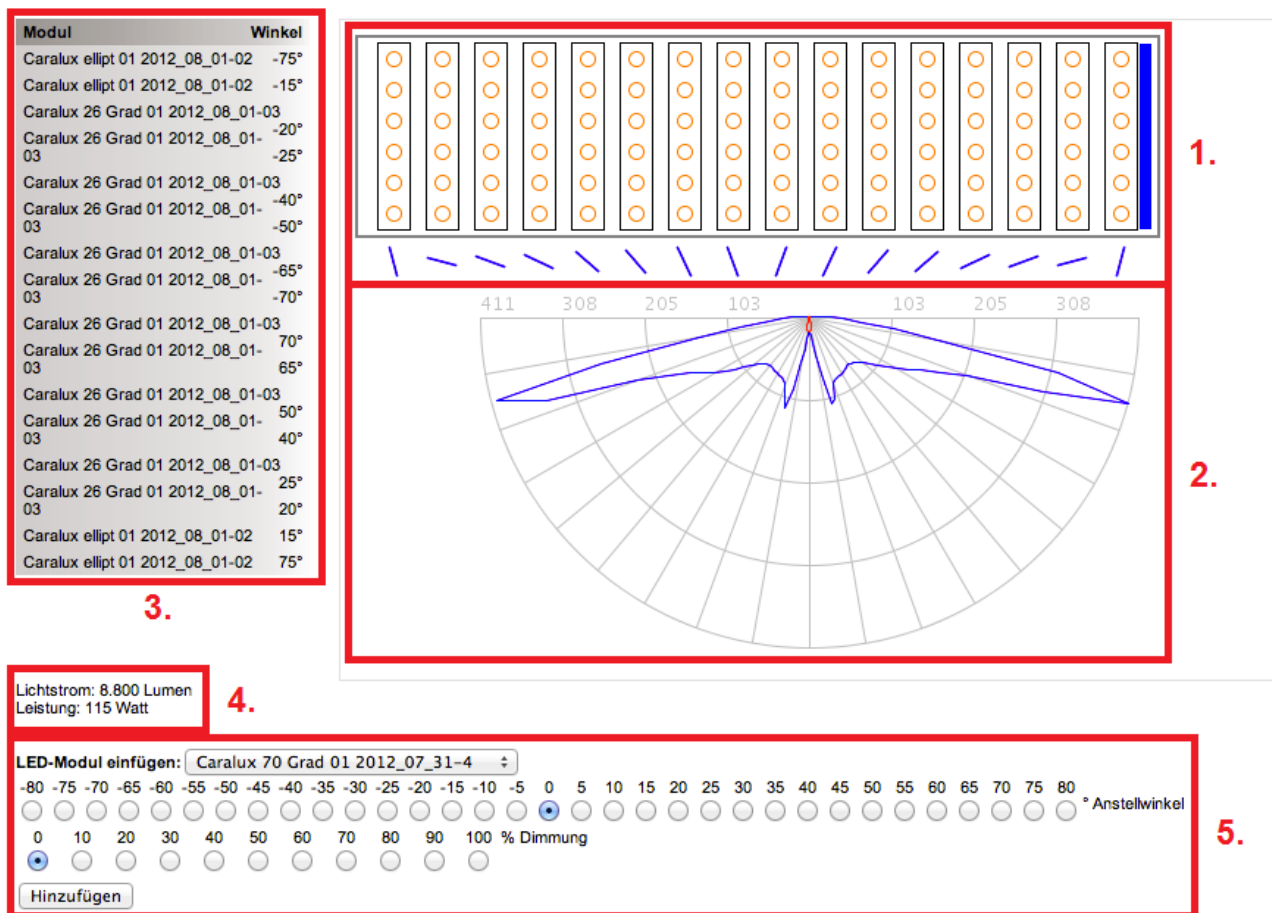
#### **Einfluss des Mastabstandes nach Tabelle 4**

Für die meisten Kombinationen aus Straßendeckschicht und Reflexionsgrad des Sehobjektes kann eine Variation des Mastabstandes innerhalb der untersuchten Verhältnisse von Lichtpunkthöhe  $h$  zu Mastabstand  $d$ :  $d/h = 3$ ;  $d/h = 4$ ;  $d/h = 5$  kompensiert werden. Dies zeigen exemplarisch die Boxplot-Ansichten von Abbildung 14 bis Abbildung 17 anhand des Sehobjektes mit  $\rho = 20\%$  bei einer R3-Deckschicht. Der größte Einfluss zeigt sich bei der Optimierung  $U_{0,E\ hor} \rightarrow \max$  mit einer Abweichung des Medians der VL  $\Delta VL_{Med,E\ hor\ opt} \approx 2$ . Es ist darauf hinzuweisen, dass aufgrund der Streckung der Verläufe auch die Bereiche schlechter Erkennbarkeit gestreckt werden und unter absoluter Betrachtung größer ausfallen.

## **6 Realisierung optimierter LVK in der Praxis**

### **6.1 Konfiguration**

Die nach Kapitel 4 entwickelten Referenz-LVK werden mit einem, speziell für adaptive Leuchten entwickelten Leuchtenkonfigurator in ein Leuchten-Setup abgebildet.



**Abbildung 18: User-Interface des Leuchtenkonfigurators.**

Der Konfigurator ist eine, in Kooperation mit *Evermind GmbH* und *CARALUX LED und Neonlicht GmbH* entwickelte Planungssoftware für adaptive LED-Straßenleuchten. Er bietet die Möglichkeit einen Gesamt-Lichtstärkeverteilungskörper aus den LVK einzelner LED-Module durch den Import ihrer jeweiligen .ldt- oder .ies-Dateien in einem, durch die jeweilige Leuchtenkonstruktion vorgegebenen Rahmen zusammenzustellen. Abbildung 18 zeigt die einzelnen Komponenten des Konfigurators.

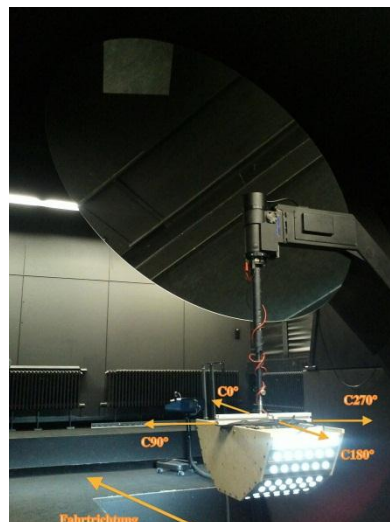
Das User-Interface ist unterteilt in die Ansicht der aktuellen LVK-Konfiguration, bestehend aus der Anordnung der verwendeten Module (1.), der resultierenden Form der LVK, normiert auf 1 klm (2.) und der genauen Stückliste der verwendeten Module (3.). Entsprechend der Moduldaten können für jeden Zwischenstand Anschlussleitung und Gesamtlichtstrom der resultierenden Leuchte angegeben werden (4.). Jedes Modul wird mittels der im Konfigurationspanel (5.) zur Verfügung stehenden Optionen eingefügt oder bearbeitet werden. Die Darstellung der LVK erfolgt nach der C-Ebenen-Darstellung in der C0°/C180°-Ebene (blau) und der C90°/C270°-Ebene (rot).

Eine automatische Anpassung der Konfiguration auf einen bestmöglichen Abgleich an eine zuvor geladene Referenz-LVK aus Kapitel 4 befindet sich im Entwicklungsstatus.

Die so mit dem Leuchtenkonfigurator generierte LVK wird daraufhin in die LED Leuchte überführt, folgend als Nachstellung bezeichnet.

## 6.2 Nachstellung

Zur Nachstellung der konfigurierten LVK wird eine flexible (adaptive) LED-Leuchte benötigt. Im Rahmen des vom BMWI geförderten Kooperationsprojektes „Intelligente LED Beleuchtung“<sup>1</sup> wurde eigens dafür die in Abbildung 20 links gezeigte LED-Leuchte entwickelt. Diese kann mit bis zu 16 austauschbaren LED-Modulen mit jeweils sechs linear angeordneten gleichen Optiken bestückt werden. Die Leuchte ist entlang der C0°/C180°-Ebene durch die individuelle Wahl, Ausrichtung und Dimmung der Einzelmodule frei konfigurierbar. Eine Anpassung – und somit eine Optimierung – auf andere C-Ebenen ist mit dieser Leuchte jedoch nicht möglich. Daher beziehen sich alle folgend beschriebenen Nachstellungen und Auswertungen sowie deren Ergebnisse ausschließlich auf die C0°/C180°-Ebene (vgl. Abbildung 19).

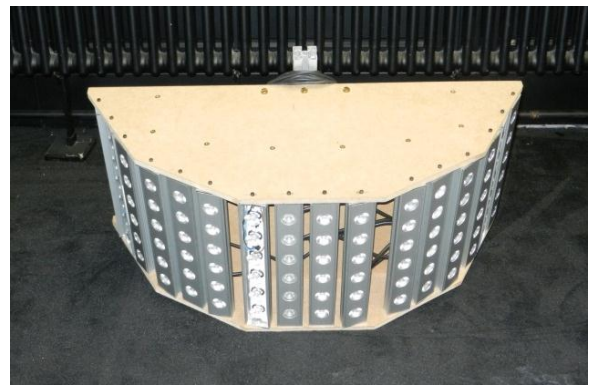
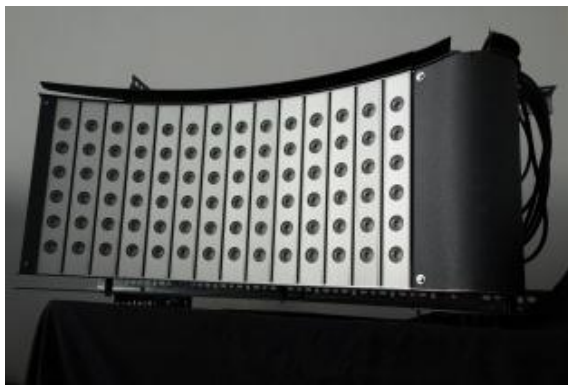


**Abbildung 19: Adaptive LED-Laborleuchte inklusive Darstellung der C-Ebenen**

Um auch sehr flache Ausstrahlungswinkel zu realisieren wurde der Leuchtenkorpus entsprechend Abbildung 20, rechts, für Laborversuche angepasst.

---

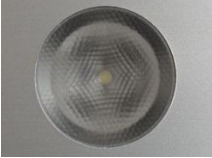


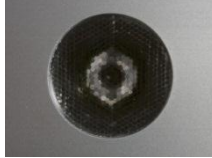
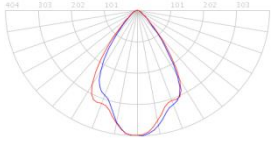
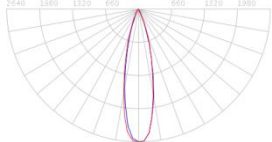
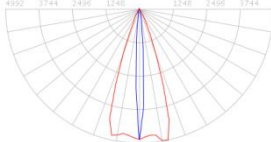
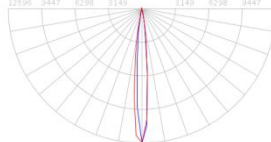
<sup>1</sup> Kooperationsprojekt „Entwicklung und Validierung technischer Konzepte für energieeffiziente, intelligente LED- Straßenbeleuchtungssysteme“ im Rahmen des Förderprogrammes „Zentrales Innovationsmanagement im Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Teilvorhaben „Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur Planung und Simulation und zur Überwachung und Steuerung von LED-Beleuchtungssystemen“.



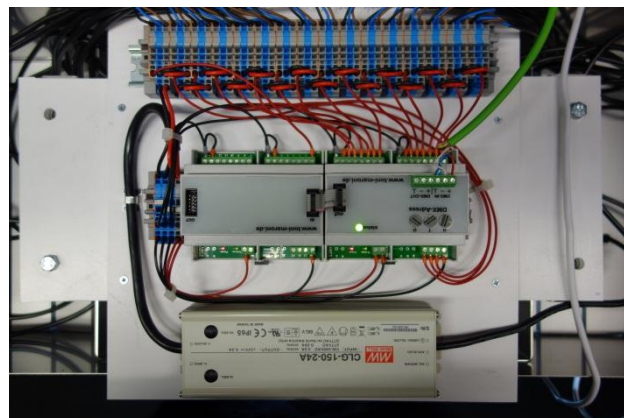
**Abbildung 20: Ursprüngliche Form der adaptiven LED-Leuchte links, Sonderanfertigung für Laborversuche auch mit sehr flachen Abstrahlwinkeln rechts.**

Im Rahmen der Untersuchung wurden vier Optiken verschiedener LVK (verschiedener Öffnungswinkel entlang der C0°/C180°-Ebene) nach Tabelle 5 verbaut. Je sechs Optiken sind zu einem Modul zusammengefasst.

*Tabelle 5: Übersicht der LED-Module, die im Rahmen der Nachstellung zum Einsatz kommen.*

Modul	70°-Modul	26°-Modul	Elliptisches Modul	6°-Modul
Optik				
LVK*				

\* C0°/C180°-Ebene (blau), C90°/C270°-Ebene (rot).



**Abbildung 21: DMX-Modul mit angeschlossenen Modulen.**

Die Dimmung der Module erfolgt in Echtzeit unter Verwendung einer DMX-Ansteuerung nach Abbildung 21. Wie die Vermessung der einzelnen LED-Module, erfolgt auch die



Messung der nachgestellten LVK im Drehspiegel-Goniophotometer in C-Ebenen und in  $\gamma$ -Winkeln in 2,5° Auflösung.

### 6.3 Erste Ergebnisse der Realisierung

Bis zum aktuellen Zeitpunkt wurden, angelehnt an die in Kapitel 5 beschriebenen Simulationen, neun Beleuchtungssituationen und die dafür berechneten Referenz-LVK untersucht. Es handelt sich um je drei Mastabstands- (d) zu Lichtpunkthöhe (h)-Verhältnisse für die Optimierungsziele  $U_{0,E\ hor} \rightarrow \max$ ,  $U_{0,E\ ver} \rightarrow \max$  und  $U_{0,L} \rightarrow \max$  für eine, zuvor als Probe vermessene Fahrbahndeckschicht mit eher spiegelnder Reflexionscharakteristik, ähnlich einer R4-Deckschicht. Die Nachstellungen für das Optimierungsziel  $|VL|_i \rightarrow \max$  werden aktuell gemessen und sollen im Rahmen des Tagungsvortrages vorgestellt werden. Die Konfiguration der Referenz-Lichtverteilung entspricht Tabelle 6.

Die gemessenen LVK zeigen, bei relativer Betrachtung der normierten Darstellung, eine vorwiegend gute Übereinstimmung mit den entsprechenden simulierten Referenz-LVK. Basis des Abgleichs der konfigurierten und gemessenen LVK mit den Referenzen der Optimierung, bildet der Vergleich zweier LVK nach Bergen (Bergen, 2011), welche sich ursprünglich mit dem Vergleich von zwei aufeinander folgend gemessenen LVK in einem Goniophotometer befasst, um Messungenauigkeiten zu beziffern. Nach der Kompensation von Unsicherheiten der Messung der LVK werden Übereinstimmungen der Lichtstärkewerte der beiden Verteilungen beschrieben nach

$$f_{\text{fit}} = 100 * \left( 1 - \sqrt{\frac{\sum_{C=0}^{360} \sum_{\gamma=0}^{180} (I_1(C, \gamma) - I_2(C, \gamma))^2}{\sum_{C=0}^{360} \sum_{\gamma=0}^{180} (I_1(C, \gamma) + I_2(C, \gamma))^2}} \right)$$

mit

$I_1(C, \gamma)$  Lichtstärken der ersten Verteilung

$I_2(C, \gamma)$  Lichtstärken der zweiten Verteilung

Bei zwei identischen LVK würde  $f_{\text{fit}}$  entsprechend einen Wert von 100 annehmen, bei zwei vollkommen gegensätzlichen LVK den Wert 0.

Tabelle 6: Optimierungsziel und Referenz-LVK der ausgewählten Beleuchtungssituationen.

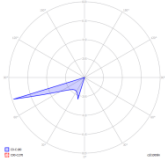
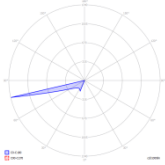
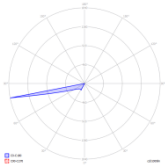
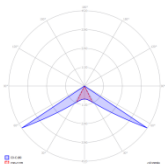
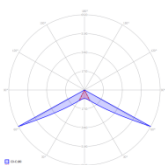
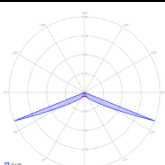
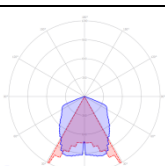
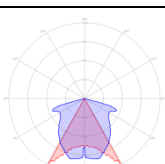
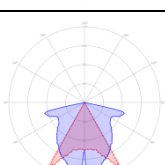
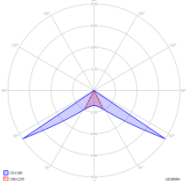
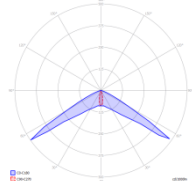
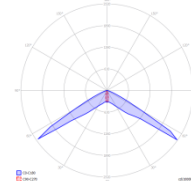
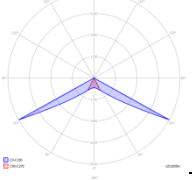
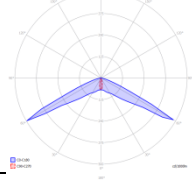
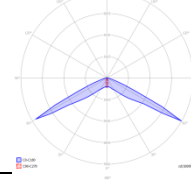
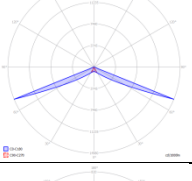
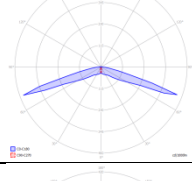
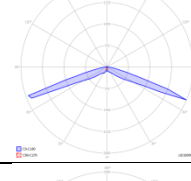
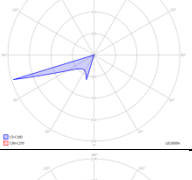
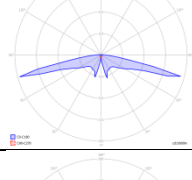
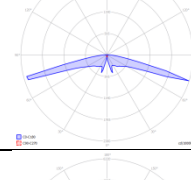
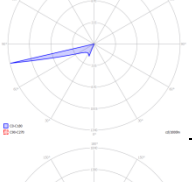
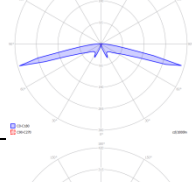
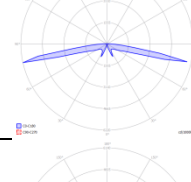
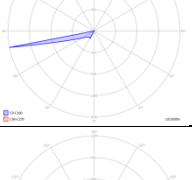
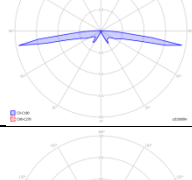
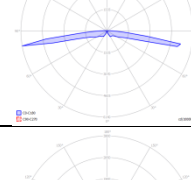

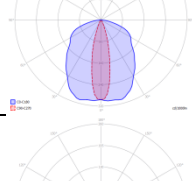
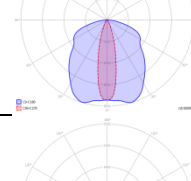

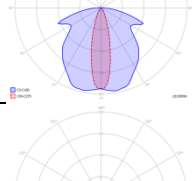
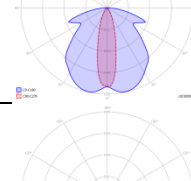
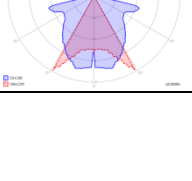
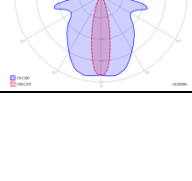
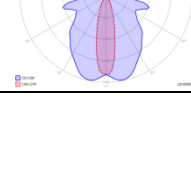
Optimierungsziel	Vorschau	Beleuchtungs- niveau	Straßenabmessungen			
			$h$ in [m]	Breite in [m]	Überhang in [m]	$d$ in [m]
$U_{0,E\ ver} \rightarrow \max;$ $d/h = 3$		12 lx	8,1	8,1	4,05	24,3
$U_{0,E\ ver} \rightarrow \max;$ $d/h = 4$		12 lx	8,1	8,1	4,05	32,4
$U_{0,E\ ver} \rightarrow \max;$ $d/h = 5$		12 lx	8,1	8,1	4,05	40,5
$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max;$ $d/h = 3$		12 lx	8,1	8,1	4,05	24,3
$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max;$ $d/h = 4$		12 lx	8,1	8,1	4,05	32,4
$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max;$ $d/h = 5$		12 lx	8,1	8,1	4,05	40,5
$U_{0,L} \rightarrow \max;$ $d/h = 3$		1 cd/m <sup>2</sup>	8,1	8,1	4,05	24,3
$U_{0,L} \rightarrow \max;$ $d/h = 4$		1 cd/m <sup>2</sup>	8,1	8,1	4,05	32,4
$U_{0,L} \rightarrow \max;$ $d/h = 5$		1 cd/m <sup>2</sup>	8,1	8,1	4,05	40,5

Tabelle 7: Gegenüberstellung der LVK

Beleuchtungssituation	Simulierte LVK	Konfigurierte LVK	Gemessene LVK
$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max;$ $d/h = 3$			
$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max;$ $d/h = 4$			
$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max;$ $d/h = 5$			
$U_{0,E\ ver} \rightarrow \max;$ $d/h = 3$			
$U_{0,E\ ver} \rightarrow \max;$ $d/h = 4$			
$U_{0,E\ ver} \rightarrow \max;$ $d/h = 5$			
$U_{0,L} \rightarrow \max;$ $d/h = 3$			
$U_{0,L} \rightarrow \max;$ $d/h = 4$			
$U_{0,L} \rightarrow \max;$ $d/h = 5$			

Ist eine Normierung der beiden LVK aufgrund von Abweichungen des Gesamtlichtstromes nötig oder muss ein C- oder  $\gamma$ -Offset korrigiert werden, wird dies entsprechend berücksichtigt (vgl. Bergen, 2011). Da beim Vergleich zweier nahezu identischer LVK, wie Bergen sie vergleicht, kaum Abweichungen toleriert und in der vorliegenden Studie LVK-Nachstellungen verglichen werden sollen, ist es notwendig, die Bewertung anzupassen. Erfahrungswerte führen zur Verwendung der folgenden Bewertungsskala für  $f_{fit}$ -Werte nach Bergen entsprechend Tabelle 8.

Tabelle 8: Angepasste Bewertungsskala für  $f_{fit}$ -Werte nach Bergen.

Bereich der $f_{fit}$ -Werte	Qualität der Übereinstimmung
80 ... 100	sehr gut
60 ... 80	gut
40 ... 60	akzeptabel
20 ... 40	schlecht
0 ... 20	sehr schlecht

Nach dieser Einordnung konnten für die untersuchten Situationen die Referenz-LVK mit einer Qualität nach Tabelle 9 nachgestellt werden.

Tabelle 9: Einordnung der gemessenen Nachstellungen in die angepasste Bewertungsskala für  $f_{fit}$ -Werte nach Bergen.

Beleuchtungssituation	$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max;$ $d/h = 3$	$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max;$ $d/h = 4$	$U_{0,E\ hor} \rightarrow \max;$ $d/h = 5$	$U_{0,E\ ver} \rightarrow \max;$ $d/h = 3$	$U_{0,E\ ver} \rightarrow \max;$ $d/h = 4$	$U_{0,E\ ver} \rightarrow \max;$ $d/h = 5$	$U_{0,L} \rightarrow \max;$ $d/h = 3$	$U_{0,L} \rightarrow \max;$ $d/h = 4$	$U_{0,L} \rightarrow \max;$ $d/h = 5$
Übereinstimmung	gut	sehr gut	sehr gut	gut	gut	akzeptabel	gut	gut	sehr gut

Ein Vergleich der absoluten Lichtströme ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Dimmung einzelner Module zur Nachstellung der jeweiligen LVK und der dadurch ausgelassenen Dynamik der Leuchte nicht möglich.

## 7 Zusammenfassung

Erste Ergebnisse der Studie zeigen auf, wie komplex die vielfältigen Einflussparameter bei der Optimierung einer Straßenbeleuchtungsanlage interagieren. Eine örtlich adaptive LED-Straßenbeleuchtung kann per se nicht eine perfekte Ausleuchtung der Fahrbahn realisieren, wenn sie nicht entsprechende Sicherheitskriterien berücksichtigt. Das jedoch auch diese Kriterien zu hinterfragen sind, zeigen die ersten Ergebnisse der Simulationen, die zum Einfluss der Optimierungsziele  $U_{0,E\ hor} \rightarrow \max$ ,  $U_{0,E\ ver} \rightarrow \max$ ,  $U_{0,L} \rightarrow \max$ ,

$|VL|_i \rightarrow \max$  durchgeführt wurden. Insbesondere die Planung und Bewertung von Beleuchtungsanlagen erscheint daraus nicht optimal und sollte weiter untersucht werden. Denn hier resultieren für die betrachteten Situationen weite Bereiche mit inakzeptablen VL-Werten  $<1,0$ . Über den gesamten Bereich der Fahrbahn liefern hier die Ansätze gleichmäßiger Leuchtdichte und direkte VL-Optimierung bessere Ergebnisse. Sehr gute Ergebnisse zeigt auch die Optimierung auf eine gleichmäßige vertikale Beleuchtungsstärke. Jedoch wird dieser Ansatz eher Spezialfällen wie der Beleuchtung von Autobahnen und Einbahnstraßen vorbehalten bleiben.

Durch die Überprüfung der resultierenden Referenz-LVK auf ihre Realisierbarkeit mit adaptiven LED-Leuchten, die sehr gute Ergebnisse zeigt, steht auch einer Anwendung in der realen ortsfesten Straßenbeleuchtung nichts im Wege.

## 8 Literatur

Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin. 2004, 2007. DIN EN 13201, Teil 1-4: Straßenbeleuchtung. German version CEN/TR 13201-1:2004. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

The IESNA ROADWAY LIGHTING COMMITTEE 2 2005: ANSI / IESNA RP-8-00. American National Standard Practice for Roadway Lighting: 2005. New York, USA: The IESNA.

CIE 1981: CIE publication 19/2 - An Analytic Model for Describing the Influence of Lighting Parameters upon Visual Performance. Vienna: CIE.

ADRIAN, W 1989. Visibility of targets: Model for calculation. Journal, Lighting Research and Technology, Volume 21, Number 4. P. 181-188.

CIE 2012. CIE Publication 115: 2010: Lighting of roads for motor and pedestrian traffic, 2. ed. CIE Central Bureau. Vienna: CIE.

WASSILEV, C.1982. Optimierung der Straßenbeleuchtung auf der Grundlage der Kontrastwiedergabe. Journal, Forschungshefte zur Verkehrssicherheit 11/12 1982, Hochschule für Verkehrssicherheit. Dresden: P. 123-137.

LECOCQ, J. 1991. Visibility level in outdoor lighting. Adrian model applied to spherical cap targets. Proceedings 22nd CIE session, Volume 1, Part 2, Division 4, Melbourne: P. 48 – 51.

GÜLER Ö., ONAYGIL S. 2003. The Effect of luminance uniformity on visibility level in road lighting. Journal, Lighting Research and Technology, Volume 35, Number 3, 2003. S. 199-215.

- SIMPSON, D. 2003. Comment: 'The Effect of luminance uniformity on visibility level in road lighting' by Ö Güler and S Onaygil. Journal, Lighting Research and Technology, Vol. 35, Number 3, 2003. P. 213f.
- PAULMIER, C.; BRUSQUE, C.; CARTA, V.; NGUYEN, V 2001. The influence of visual complexity on the detection of targets investigated by computer generated images. Journal, Lighting Research and Technology, Volume 33, Number 3, P. 197-207.
- DIJON, JM.; MALDAGUE, L 1998: Quality criteria for road lighting and uniformity levels? Or visibility? Second National Illumination Congress, Istanbul, Turkey. P. 138–141.
- EBERBACH, K. 1973. Lichtstärkeverteilungen bei optimaler Leuchtdichtegleichmäßigkeit in der Straßenbeleuchtung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe.
- ENZMANN, J.1977. Über die Sichtbarkeit von Objekten bei der Beleuchtung von Straßen. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe (TH). Karlsruhe.
- DI FRAIA, L. 1994. Expert System for Automatic Design of Optimized Road Lighting Systems. Journal, Svetotekhnika, Volume 4, pp. 1-4.
- LESZCZYNSKA, H.; KURZAWA, M.1990. Multikriterielle Optimierungsmethode und ihre lichttechnische Anwendung. Proceedings of Licht 90 in Rotterdam. Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde: Arnhem. P. 407 - 415.
- PACHAMANOV, A.L; PACHAMANOVA, D. 2008. Optimization of the light distribution of luminaries for tunnel and street lighting. Journal, Engineering Optimization, Vol. 40, No. 1. P. 47-65.
- STEFANOV, S. BL.; VASILEV, H. N.2009. Optimizing Parameters of Street Lighting Systems Designed by Small Target Visibility Criteria. Proceedings of LUX Europa 2009, S.1213 -1220. Istanbul.
- WINTER, J.; BUSCHMANN, S.; FRANKE, R. SACHDEVA, S., 2012: RoadRad: Road Lighting Simulation with Radiance. Software, TU Berlin, Berlin, Germany.
- FRANKE, R., 2012: Gütebewertung und Optimierung von Straßenbeleuchtungssimulationen mit RADIANCE. Bachelor Thesis, TU Berlin, Berlin, Germany.