

Zum Einfluss optimierter Lichtstärkeverteilungskörper auf die Erkennbarkeit bei niedrigen Beleuchtungsniveaus in der Straßenbeleuchtung

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur

Sebastian Schade

geboren in Bad Hersfeld

von der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Möller
Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker
Gutachter:	Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz
Gutachter:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27. Juli 2015

Berlin 2015

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich all denen, die zum Gelingen dieses Werkes aktiv beigetragen haben, meinen herzlichen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Prof. Dr. Stephan Völker, Prof. Dr. Christoph Schierz und Prof. Dr. Cornelius Neumann, welche mir als Mentoren immer zum kritischen wissenschaftlichen Diskurs zur Verfügung standen. Insbesondere das Engagement von Herrn Prof. Dr. Stephan Völker, die Thematik der Arbeit mit aktuellen Forschungsprojekten zu verbinden, um so die finanziellen Möglichkeiten für die Untersuchungen bereitzustellen, soll hervorgehoben sein.

Für ihre Unterstützung und das hervorragende Arbeitsklima während meiner Zeit am Fachgebiet Lichttechnik danke ich meinen ehemaligen Kommilitonen und Mitarbeitern sowie allen von mir betreuten Studenten. Hier möchte ich namentlich Juri Steblau für sein Engagement bei der Erstellung des Simulationswerkzeuges und Yu-Wen Lu für die unzähligen Radiance Berechnungen wertschätzend erwähnen. Ohne die Anstrengungen von Dr. Martine Knoop und Dr. Heiko Herzberg zum Fortbestand der Laborräume wären die praktischen lichttechnischen Messungen wohl nicht zustande gekommen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meinen Korrekturlesern Dr. Martine Knoop, Dr. Felix Serick, Dr. Michael Böhm, Hans-Georg Schmidt sowie meiner Schwester Natalie Schade.

Für ihre Begeisterung und Kritik durch all die langen fachlichen und persönlichen Gespräche möchte ich Carolin Liedtke, Dr. Raphael Kirsch und Hans-Georg Schmidt danken. Sie gaben mir die Motivation durchzuhalten.

Ferner möchte ich mich bei Anne Richter bedanken, die mich nicht nur tatkräftig unterstützt, sondern auch stets aufgebaut und für die nötige Regeneration gesorgt hat.

Abschließend gilt persönlicher Dank meinen Eltern und Geschwistern, die diese Arbeit durch alle Phasen hinweg mit außerordentlicher Unterstützung begleitet haben.

KURZFASSUNG

Seit der Einführung der Straßenbeleuchtung besteht ein Zielkonflikt zwischen dem Bestreben geringer Anlagenbetriebskosten und der Forderung nach angemessen hoher Beleuchtungsqualität zur Wahrung der Verkehrssicherheit. Mit den steigenden Energiekosten nimmt der Druck, Beleuchtungsanlagen auf ein Mindestbeleuchtungsniveau hin zu dimensionieren, weiter zu. Aus lichttechnischer Sicht kann dieser Konflikt durch eine optimal dimensionierte Verteilung des Lichts auf die Verkehrsfläche entschärft werden. Allerdings orientieren sich die Qualitätsvorgaben bestehender Planungs- und Bewertungsansätze an den lichttechnischen Möglichkeiten vergleichsweise inflexibler konventioneller Beleuchtungstechnologien. Anhand der Erkennbarkeit einfacher Sehobjekte auf der Fahrbahn klärt die Arbeit auf, welche Sicherheit diese Ansätze bereitstellen, wenn sie mittels optimierter Lichtstärkeverteilungskörper (LVK) bestmöglich erfüllt werden und identifiziert mögliche Verbesserungspotentiale. Die etablierten Optimierungsansätze Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte und Visibility Level (*VL*) bilden dafür den Untersuchungsschwerpunkt. Installationsspezifisch erzeugte LVK werden im Rahmen der Untersuchungen so optimiert, dass sie für ein festgelegtes Beleuchtungsniveau eine größtmögliche Gesamtgleichmäßigkeit oder ein Mindestniveau an Erkennbarkeit bereitstellen. Gleichzeitig wird der benötigte Gesamtlichtstrom so gering wie möglich gehalten, um so unnötig hohen Energiebedarf zu vermeiden. Die vergleichende Bewertung der bereitgestellten Erkennbarkeit erfolgt mittels des *VL* und unter Verwendung flacher Sehobjekte unterschiedlichen Reflexionsgrades. Simulationen und exemplarische Nachstellungen von Beleuchtungsszenen decken Zusammenhänge zwischen den Bewertungsansätzen auf. So präzisiert die Arbeit den Gültigkeitsbereich vorangegangener Forschung zu den betrachteten Methoden und liefert neue Erkenntnisse für deren zielgerichtete Anwendbarkeit. Ein einzelner Ansatz, welcher für alle Beleuchtungssituationen die besten Sichtbedingungen bereitstellt, erwies sich dabei nicht als nachweisbar. Denn, wie die Arbeit zeigt, ist die bisher angestrebte hohe Gleichmäßigkeit bei adäquatem Beleuchtungsniveau allein kein Garant für gute Erkennbarkeit. Stattdessen ist situationsspezifisch oft eine Kombination aus Leuchtdichteniveau, Leuchtdichtegleichmäßigkeit und *VL* optimal. Die Resultate werden in einem Katalog fundierter Empfehlungen, unter welchen Bedingungen sich die verschiedenen Ansätze vorteilhaft anwenden lassen, zusammengefasst. Installationsbedingte Einflüsse, wie der Einfluss der Straßendeckschicht auf die Optimierungen oder die Auswirkungen der Vergrößerung des Lichtpunktabstandes im Verhältnis zur Lichtpunkthöhe runden werden ebenfalls diskutiert.

Schlagwörter: *Straßenbeleuchtung, Lichtstärkeverteilungskörper, optimierte Lichtverteilungen, adaptive Beleuchtung, Erkennbarkeit, Visibility Level, Energieeffizienz*

ABSTRACT

Since the introduction of street lighting, there has been a trade-off between the desire to lower operating costs and the demand for appropriate lighting quality to maintain road safety. Ever-increasing energy costs demand the dimensioning of lighting systems limited to a minimum luminance or illuminance level. From a technical perspective, this conflict can be mitigated by an optimally matched distribution of light on the road surface. However, the requirements of existing planning and evaluation approaches are still based on comparatively inflexible conventional lighting technologies. Using flat targets visibility on the road this work clarifies, which level of security is provided by existing quality criteria when optimized using luminous intensity distributions (LID). The most common optimization approaches, illuminance, luminance, and visibility level (*VL*), are in the main focus of this study. Installation-specific LID are optimized to provide maximum luminance/illuminance uniformity or a minimum visibility level for a given average luminance/illuminance. At the same time the total luminous flux is kept to a minimum in order to avoid unnecessary energy usage. The comparative assessment of small object detection is evaluated calculating the *VL* of flat targets of different reflectances. Using simulations and exemplary reproduction of lighting scenes, the optimized LID help to unravel dependencies between common assessment approaches. In this way this work helps to clarify the range of validity of previous research on different evaluation techniques and provides new insights on their application. As a result, a single approach providing the best visibility conditions for all lighting situations did not prove effective. The study shows that aiming on high uniformity at an adequate lighting level alone will not guarantee good visibility. Instead, a selection of average luminance, luminance uniformity, and *VL* leads to more meaningful results. The outcomes of this work are then combined in a catalog of recommendations, showing under which conditions the various approaches can be applied advantageously. Installation-related factors, such as the influence of the road surface or the impact of a change in pole spacing in relation to the mounting height are also discussed.

Keywords: Road lighting, street lighting, luminous intensity distribution, optimized light distribution, visibility level, small target visibility, adaptive street lighting, energy efficiency

SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Symbol	Beschreibung	Einheit
$a, a(\alpha, L_u)$	Blondel-Rey-Konstante, Korrekturfaktor bei Darbietungsdauern	
a	Koeffizient der Polynombeschreibung von Lichtstärkeverteilungskörpern	
A	Maximaler prozentualer Lichtstärkesprung je Grad zwischen zwei Lichtstrahlen des Lichtstärkeverteilungskörpers	[%]
A_i	Einem Messpunkt zugeordnetes Flächenelement	[m ²]
AF	Altersfaktor bei der Berechnung von Leuchtdichteunterschiedsschwellen	
α	Sehobjektwinkel, Winkelgröße des Sehobjektes in Winkelminuten	[Min.]
B	Beobachterposition	
β	Einstrahlwinkel zwischen Beobachtungsebene und der vertikalen Ebene der kürzesten Verbindung zwischen Berechnungspunkt und Lichtpunkt	[°]
C	Kontrast, Sehobjektcontrast	
C	Winkelbeziehung: Azimut, ausgehend der ersten photometrischen Achse	
$C1, C2$	Fahrbahndeckschichtcharakteristik nach Reflexionstabelle	
C_{th}	Schwellenkontrast, Kontrastschwelle	
C_{red}	Durch die äquivalente Schleierleuchtdichte reduzierter Kontrast	
C_s, CS	Unterschiedsempfindlichkeit, engl. Contrast Sensitivity	
$C_{s,Kok}$	Schwellenkontrast nach Kokoschka	
d	Interpolationsabstand	
$\Delta\gamma$	Winkelabstand	[°]
ΔL	Leuchtdichteunterschied zwischen Sehobjekt und Umfeld	[cd/m ²]
ΔL_{BL}	Schwellenwert bei einer Adaptationsleuchtdichte	[cd/m ²]
ΔL_{neg}	Negativer Leuchtdichteunterschiedswert	[cd/m ²]
ΔL_{oB}	Schwellenwert bei einer Adaptationsleuchtdichte	[cd/m ²]
ΔL_{pos}	Positiver Leuchtdichteunterschiedswert	[cd/m ²]
ΔL_s	Linearisierung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle	[cd/m ²]
ΔL_t	Leuchtdichteunterschiedsschwelle in Abhängigkeit der Darbietungsdauer t	[cd/m ²]
$\Delta L_{t=2s}$	Leuchtdichteunterschiedsschwelle bei 2 s Darbietungsdauer	[cd/m ²]
ΔL_{th}	Leuchtdichteunterschiedsschwelle	[cd/m ²]
$\Delta L_{th,Hentschel}$	Leuchtdichteunterschiedsschwelle nach Hentschel	[cd/m ²]
ΔU	Gleichmäßigkeitsunterschied	
$\Delta VL_{min,max}$	VL -Differenz zwischen minimalem und maximalem VL	[cd/m ²]
d_{mess}	Messentfernung	[m]
E_{Bl}	Blendbeleuchtungsstärke im Auge	[lx]
E_{hor}	Horizontale Beleuchtungsstärke	[lx]
\bar{E}_{hor}	Mittlere horizontale Beleuchtungsstärke, Beleuchtungsniveau von E_{hor}	[lx]
$E_{hor,ges}$	Gesamtbeleuchtungsstärke in einem Punkt, horizontal	[lx]
$E_{hor,i}$	Einzelbeleuchtungsstärke, horizontal	[lx]

Symbol	Beschreibung	Einheit
$E_{hor,max}$	Maximale Beleuchtungsstärke, horizontal	[lx]
$E_{hor,min}$	Minimale Beleuchtungsstärke, horizontal	[lx]
E_o	Vertikale Beleuchtungsstärke auf dem Sehobjekt	[lx]
$E_{o,direkt}$	Vertikale Beleuchtungsstärke auf dem Sehobjekt, direkter Anteil	[lx]
$E_{o,indirekt}$	Vertikale Beleuchtungsstärke auf dem Sehobjekt, indirekter Anteil	[lx]
E_{ver}	Vertikale Beleuchtungsstärke	[lx]
\bar{E}_{ver}	Mittlere vertikale Beleuchtungsstärke	[lx]
$E_{ver,max}$	Maximale Beleuchtungsstärke, vertikal	[lx]
$E_{ver,min}$	Minimale Beleuchtungsstärke, vertikal	[lx]
f	Unsicherheit, Fehler, Abweichung	
F_{CP}	Kontrastpolaritätsfaktor	
g_1	Gesamtgleichmäßigkeit der horizontalen Beleuchtungsstärke	
g_2	Längsgleichmäßigkeit der horizontalen Beleuchtungsstärke	
γ	Winkel zur Charakterisierung der Ausstrahlrichtung; im Zusammenhang mit CIE-Definition der LVK vertikaler Winkel, ab der ersten photometrischen Achse, Lichteinfallswinkel	[°]
γ_1	Einstrahlwinkel zwischen Z-Achse und der kürzesten Verbindung zwischen Berechnungspunkt und Ausstrahlpunkt,	[°]
γ_2	Winkel zwischen Lichtstrahl und Flächennormalen	[°]
H	Lichtpunkthöhe, Masthöhe	[m]
h_B	Beobachterhöhe	[m]
$I, I(\gamma, \varphi)$	Lichtstärke, abhängig von der Ausstrahlrichtung	[cd]
i	Indizes	
I_{Bl}	Lichtstärke der blendungsverursachenden Lichtquelle	[cd]
j	Index der Beobachtungsrichtung	
KF	Umrechnungsfaktor	
k	Faktor zur Berücksichtigung des Alters	
k, k_{Bl}	Konstante, Einfluss des Beobachteralters auf physiologische Belendung	
k_p	Faktor zur Berücksichtigung der Wahrnehmungswahrscheinlichkeit	
L	Lichtpunkt	
L	Leuchtdichte	[cd/m ²]
\bar{L}	Mittlere Leuchtdichte, Leuchtdichteniveau	[cd/m ²]
\bar{L}_{mess}	Mittelwert der im definierten Messfeld real gemessenen Leuchtdichten	[cd/m ²]
L_{ad}	Adaptationsbestimmende Umfeldleuchtdichte	[cd/m ²]
$L_{ad,RP}$	Adaptationsbestimmende Umfeldleuchtdichte nach ANSI IESNA RP-8-00	[cd/m ²]
L_{max}	Maximale Leuchtdichte	[cd/m ²]
L_{min}	Minimale Leuchtdichte	[cd/m ²]
L_o	Leuchtdichte eines Sehobjektes	[cd/m ²]
L_p	Leuchtdichte eines Punktes P auf der Fahrbahn aus Beobachtersichtung	[cd/m ²]
L_s	Schleierleuchtdichte	[cd/m ²]
$L_{s,äq}$	Äquivalente Schleierleuchtdichte	[cd/m ²]
\bar{L}_{Str}	Mittlere Fahrbahnleuchtdichte nach Hentschel	[cd/m ²]
L_u	Umfeldleuchtdichte	[cd/m ²]
L_{unt}	Untergrundleuchtdichte	[cd/m ²]
$L_{unt,RP}$	Untergrundleuchtdichte nach ANSI IESNA Standard RP-8-00	[cd/m ²]

Symbol	Beschreibung	Einheit
L_{umf}	Umfeldleuchtdichte, bei Differenzierung nach Umfeld und Untergrund	[cd/m ²]
L_{Fahrbahn}	Allgemeine Fahrbahnleuchtdichte	[cd/m ²]
m	Index (z. B. einer Fahrbahndeckschicht)	
n	Index (z. B. einer Leuchte)	
N_0, N_u	Differenzierte Gesamtanzahl	
N	Gesamtanzahl	
Ω	Raumwinkel	
Ω_0	Einheitsraumwinkel	
p	Wahrnehmungswahrscheinlichkeit	
p_{rev}	Kumulative Wahrscheinlichkeit des Erkennen eines Sehobjektes nach dem Revealing-Power-Ansatz für Positiv- oder Negativkontraste	
p	Index der Leuchtenhöhe	
p	Exponent der Distanzgewichtung im Falle der inversen Distanzgewichtung	
Φ	Lichtstrom	[lm]
φ	Azimutwinkel zwischen Fahrbahnrichtung und der Projektion der Ebene zwischen Messpunkt und Lichtquelle auf der Fahrbahn	[°]
φ	Verdrehwinkel zwischen vertikaler Einfall- und Beobachtungsebene	[°]
q	Leuchtdichtekoeffizient	
q_0	Mittlerer Leuchtdichtekoeffizient	
ρ	Reflexionsgrad	[%]
ρ_0	Reflexionsgrad des Sehobjektes	[%]
ρ_k	Kritischer Reflexionsgrad eines Sehobjektes	[%]
ρ_{ref}	Referenzreflexionsgrad	[%]
$r(\gamma, \varphi)$	Reflexionskoeffizient, abhängig von Lichteinfallswinkel γ	
r	Index, Laufvariable der Potenz des C-Winkels,	
R	Abstand zwischen Lichtpunkt und Messpunkt (z. B. der Beleuchtungsstärke mit dem Flächenabschnitt dA_i)	[m]
R_{Bl}	Abstand zur blendungsverursachenden Lichtquelle	[m]
r_{Leuchte}	Radius der Lichtaustrittsfläche einer Leuchte	[m]
RP	Revealing Power, Erkennbarkeitsleistung	
$RP_{\text{Silhouette}}$	Revealing Power für Negativkontraste (Silhouette-Prinzip)	
R1 ... R4	Straßendeckschichtkategorien r -Tabelle	
R^2	Bestimmtheitsmaß	
s	Index, Laufvariable der Potenz des γ -Winkels	
s	Lichtpunkt- oder Mastabstand	[m]
S	Praxisfaktor	
s	Standardabweichung	
S_{rel}	Relativer Lichtpunktabstand, relativer Mastabstand	
S_0, S_1	Fahrspuren 0 (den Leuchten abgewandt) und 1 (den Leuchten zugewandt)	
$S1$	Glanzfaktor zur Beschreibung der Spiegelung an Fahrbahndeckschichten	
$S2$	Faktor zur Beschreibung der Spiegelung an Fahrbahndeckschichten	
s^2	Varianz	
θ	Blendwinkel zwischen Blickrichtung des Beobachters und Blendquelle	[°]
σ	Neigung des Beobachtungswinkels	[°]
STV	Small Target Visibility	
$STVL$	Small Target Visibility Level	
$STVL_{\text{min}}$	Minimales $STVL$	

Symbol	Beschreibung	Einheit
t	Darbietungszeit	[s]
TI	Schwellenwerterhöhung (engl. Threshold Increment)	
TSF	Transienter Schwellenwerterhöhungsfaktor	
$U_{l,L}$	Längsgleichmäßigkeit der Leuchtdichte	
$U_{l,Ehor}$	Gesamtgleichmäßigkeit der horizontalen Beleuchtungsstärke, auch g_1	
$U_{l,Ever}$	Längsgleichmäßigkeit der vertikalen Beleuchtungsstärke	
$U_{o,L}$	Längsgleichmäßigkeit der Leuchtdichte	
$U_{o,Ehor}$	Gesamtgleichmäßigkeit der horizontalen Beleuchtungsstärke, auch g_1	
$U_{o,Ever}$	Gesamtgleichmäßigkeit der vertikalen Beleuchtungsstärke	
U_l	Längsgleichmäßigkeit	
$V(\lambda)$	Spektrale Empfindlichkeitsfunktion eines photopisch adaptierten 2°-Normalbeobachters	
VL	Visibility Level, Überschwelligkeit	
\overline{VL}	Arithmetisches Mittel Visibility Level	
VL_{max}	Maximum Visibility Level	
VL_{med}	Median Visibility Level	
VL_{min}	Minimum Visibility Level	
VL_{Praxis}	Visibility Level unter Einbeziehung von Praxiseinflüssen	
W_L, W_{Ln}	Breite der Fahrspur mit $n = (1; 2)$	[m]
$W_{L, red}$	Reduzierte Messfeldbreite, reduzierte Fahrbahnbreite	[m]
W_S	Breite der Straße bzw. Fahrbahn	[m]
X_{VL}	Grenze der Randbedingung für VL	
Kürzel	Beschreibung	
ANSI	American National Standards Institute	
AV	Abhängige Variable	
BRDF	Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion	
bzw.	Beziehungsweise	
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage: Internationale Beleuchtungskommission	
DIN	Deutsches Institut für Normung	
EN	Europäisches Institut für Normung, Europäische Norm	
F	Forschungsfrage	
GUI	Grafische Benutzeroberfläche (engl. Graphical User Interface)	
H	Hypothese	
IDW	Inverse Distanzgewichtung	
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America	
Kfz	Kraftfahrzeug	
LED	Leuchtdiode, engl. light-emitting diode	
LVK	Lichtstärkeverteilungskörper, auch Lichtstärkeverteilungskurve	
RLVK	Referenz-LVK	
u. a.	Unter anderem, und andere	
U	Untersuchungsfeld	
UV	Unabhängige Variable	
vgl.	Vergleiche	
z. B.	Zum Beispiel	

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	III
Kurzfassung	V
Abstract	VII
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	IX
Inhaltsverzeichnis	XIII
Kapitel 1	
Einleitung	1
<hr/>	
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.2 Inhalt und Aufbau der Arbeit	2
1.3 Betreute wissenschaftliche Arbeiten	3
Kapitel 2	
Wissenschaftliche Ausgangssituation	4
<hr/>	
2.1 Übergreifende Berechnungsgrundlagen	4
2.1.1 Lichtstärkeverteilungskörper.....	4
2.1.2 Fahrbahndeckschichten.....	5
2.1.3 Beobachter und Beobachtung	7
2.2 Bewertung der visuellen Qualität der Straßenbeleuchtung	8
2.2.1 Bewertung anhand des Beleuchtungsniveaus	9
2.2.2 Bewertung anhand der Gleichmäßigkeit.....	10
2.2.3 Berücksichtigung der Blendung.....	12
2.2.4 Bewertung mittels erkennbarkeitsorientierter Ansätze	12
2.2.4.1 Leuchtdichteunterschiedsschwelle	13
2.2.4.2 Relevante Leuchtdichten.....	15
2.2.4.3 Sehobjekteigenschaften	16

2.2.4.4	Wahrnehmungswahrscheinlichkeit.....	20
2.2.4.5	Kontrastpolarität.....	21
2.2.4.6	Darbietungszeit.....	22
2.2.4.7	Einfluss des Alters.....	23
2.2.4.8	Einfluss der Komplexität des Gesichtsfeldes	23
2.2.4.9	Quantifizierung der Blendung	24
2.2.4.10	Objektkontrast und Schwellenkontrast	26
2.2.4.11	Visibility Level	28
2.2.4.12	Small Target Visibility-Konzept.....	29
2.2.4.13	Revealing Power und kritischer Reflexionsgrad.....	29
2.2.4.14	Beobachtungsbedingungen in der praktischen Anwendung	31
2.2.5	Aktuelle Anforderungen an die Erkennbarkeit.....	31
2.3	Optimierung von Lichtstärkeverteilungskörpern.....	33
2.3.1	Optimierung auf Sicherheit	33
2.3.2	Optimierung auf Energieeinsparung	34
2.4	Ableitung der Relevanz der Arbeit aus den aktuellen Erkenntnissen.....	35
Kapitel 3		
Untersuchungsmethodik		36
<hr/>		
3.1	Ableitung der Forschungsfragen aus der Zielstellung	36
3.2	Getroffene Festlegungen.....	38
3.2.1	Zusammenfassender Begriff des Beleuchtungsniveaus	38
3.2.2	Lichtstärkeverteilung und Lichtverteilung	39
3.2.3	Installationsgeometrie und Fahrbahneigenschaften	39
3.2.4	Bewertungsfeld.....	42
3.2.5	Beobachter und Beobachtung.....	43
3.2.6	Sehobjekt.....	44
3.2.7	Kontrastprinzip der Erkennbarkeitsoptimierung	45
3.3	Definition der Arbeitshypothesen.....	46
3.4	Umfang der Operationalisierung	48

 Kapitel 4

Generierung optimierter Lichtstärkeverteilungskörper	50
4.1 Ansatz.....	50
4.2 Zielfunktion.....	50
4.3 Gleichmäßigkeitsorientierte Optimierungen	51
4.3.1 Horizontale Beleuchtungsstärke.....	52
4.3.2 Vertikale Beleuchtungsstärke.....	53
4.3.3 Leuchtdichte.....	53
4.4 Erkennbarkeitsorientierte Optimierung.....	55
4.4.1 Linearisierung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle.....	55
4.4.2 Lineare Optimierung	56
4.4.3 Integration der Visibility Level Optimierung.....	56
4.5 Differenzierte Begrenzung der Schwellenwerterhöhung	59
4.6 Systemimplementierung.....	60

Kapitel 5

Auswirkungen unterschiedlich optimierter Lichtverteilungen	63
5.1 Konventionen	63
5.2 Gleichmäßigkeitsorientierte Optimierungen	64
5.2.1 Realisierte Lichtstärkeverteilungskörper.....	64
5.2.2 Resultierende Lichtverteilungen auf der Fahrbahn	67
5.2.3 Resultierende Erkennbarkeiten, stationäre Beobachtung.....	69
5.2.3.1 Einfluss Sehobjektreflexionsgrad.....	69
5.2.3.2 Einfluss Fahrbahndeckschicht.....	73
5.2.3.3 Einfluss Lichtpunktstand	75
5.2.3.4 Vergleich der U_o -orientierten Ansätze	78
5.2.4 Resultierende Erkennbarkeiten, dynamische Beobachtung	80
5.2.5 Zusammenfassung.....	83
5.3 Erkennbarkeitsorientierte Optimierung.....	84
5.3.1 Realisierte Lichtstärkeverteilungskörper.....	84
5.3.2 Resultierende Lichtverteilungen	87
5.3.3 Resultierende Erkennbarkeiten	91
5.3.3.1 Einfluss Sehobjektreflexionsgrad.....	91

5.3.3.2 Einfluss Fahrbahndeckschicht	94
5.3.3.3 Einfluss Lichtpunktabstand	96
5.3.4 Zusammenfassung	96
5.4 Kennzahlensysteme	97
5.4.1 Vergleich der <i>VL</i> -Verläufe mit der <i>STVL</i> -Methode	97
5.4.2 Separate Bewertung der Blendung mittels <i>TI</i>	100
5.5 Minimierung des Lichtstromes	102
Kapitel 6	
Verifikation im Laborversuch	104
<hr/>	
6.1 Versuchssetup	104
6.2 Durchführung	107
6.3 Resultierende Lichtstärkeverteilungskörper	109
6.4 Erzielte Leuchtdichte-, Beleuchtungsstärke- und <i>VL</i> -Verteilungen	110
6.4.1 Gleichmäßigkeitsorientierte Optimierungen	110
6.4.2 Erkennbarkeitsorientierte Optimierung	112
6.5 Vergleich der Simulationen und Labormessungen	114
6.6 Zusammenfassung	116
Kapitel 7	
Unsicherheitsbetrachtung	117
<hr/>	
7.1 <i>VL</i> -Bestimmung	118
7.2 Berechnung und Simulation der Lichtstärkeverteilungskörper	118
7.2.1 Abweichungen durch Interpolation bei Transformation und Glättung	118
7.2.2 Linearisierung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle	119
7.2.3 indirekte Beleuchtung und Schattenbildung des Sehobjektes	120
7.2.4 Anzahl der berücksichtigten Lichtpunkte	121
7.2.5 Unsicherheiten bei der <i>VL</i> -Berechnung	121
7.2.6 Gesamtunsicherheit der Simulationen	122
7.3 Unsicherheiten Messung	122
7.3.1 Bestimmung des Lichtstärkeverteilungskörpers	122
7.3.2 Leuchtenmontage und -Einstellung	123
7.3.3 Messung Beleuchtungsstärke	123

7.3.4 Bildaufgelöste Messung der Leuchtdichte	124
7.3.5 Verwendung einfacher Sehobjekte zur Kontrastbestimmung	127
7.3.6 Unsicherheit Deckschicht.....	127
7.3.7 Unsicherheit Bestimmung Reflexionsgrade.....	128
7.3.8 Unsicherheit Streulicht.....	128
7.3.9 Gesamtunsicherheit Messungen im Lichtkanal.....	128

Kapitel 8

Diskussion im Kontext des Forschungsfeldes	129
--	-----

8.1 Umsetzung und Untersuchung Optimierungsmethoden.....	130
8.1.1 Umsetzung des Primärziels Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke	130
8.1.2 Umsetzung des Primärziels Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte.....	130
8.1.3 Umsetzung des Primärziels gute Erkennbarkeit.....	131
8.1.4 Einhaltung der Blendungsbegrenzung	132
8.1.5 Vergleich Ergebnisse und wahrnehmungsphysiologische Forderungen.....	132
8.2 Beleuchtungsinstallation und Beobachtungsform	133
8.2.1 Einfluss des Sehobjektreflexionsgrades auf die Erkennbarkeit	133
8.2.2 Einfluss der Straßendeckschicht auf die Erkennbarkeit	134
8.2.3 Einfluss des relativen Mastabstandes auf die Optimierungsergebnisse	135
8.2.4 Einfluss der Beobachtungsart zur Bestimmung der Erkennbarkeit.....	135
8.3 Aussagekraft und Vergleichbarkeit weiterer Qualitätskennzahlensysteme.....	136
8.4 Betrachtung des Lichtstroms als sekundäres Optimierungsziel	137

Kapitel 9

Schlussfolgerungen und Ausblick	139
---------------------------------------	-----

9.1 Zusammenfassendes Fazit.....	139
9.2 Ausblick	142

Anhang A

Tabellen und Übersichten	A-1
A.1 Randparameter Standard-R- und –C-Deckschichten	A-1
A.2 Betreute studentische Arbeiten	A-2
A.3 Übersicht der gesamten Parametervariation	A-3
A.4 Übersicht Ergebnisse Lichtverteilungen	A-5
A.5 Übersichten Ergebnisse Erkennbarkeiten	A-9
A.5.1 Horizontale Beleuchtungsstärke	A-9
A.5.2 Vertikale Beleuchtungsstärke	A-11
A.5.3 Leuchtdichte	A-13
A.5.4 VL-Optimierung	A-15
A.6 Übersicht STVL-Werte	A-17
A.7 Übersicht Einfluss Mastabstand	A-19
A.8 Ergänzung Lichtstrombedarf	A-24
A.9 Anhänge zum Laborversuch	A-25
A.9.1 Einfluss Streulicht	A-25
A.9.2 Reflexionstabelle und Kennwerte Laborteppich	A-25
A.9.3 Laborleuchte und Steuerung	A-27
A.9.4 Leuchtekonfigurator	A-29
A.9.5 Übersicht realisierte LVK Laborversuch	A-30
A.9.6 Übersicht Vergleiche Erkennbarkeiten Simulation und Messung	A-34
A.10 Daten Messgeräte	A-37
A.11 Verwandte Publikationen	A-37

1

EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION UND ZIEL DER ARBEIT

Mit der zunehmenden Etablierung der LED¹-Technik im Bereich der Straßenbeleuchtung vollzieht sich ein Wandel in der Planung und Realisierung von neu zu errichtenden Beleuchtungsanlagen. Die Verteilung des Lichtes auf die Zielfläche kann heute in einer Präzision erfolgen, die bisher nicht möglich war. Lichtstärkeverteilungskörper (LVK) – diese beschreiben die vektorielle Verteilung der Lichtstärken eines Lichtpunktes im Raum – können durch Simulationswerkzeuge auf weitgehend beliebige Anforderungen hin entwickelt werden. Die Einführung dieser hochentwickelten ortsfesten Beleuchtungsanlagen im öffentlichen Raum geht über den Effizienzgewinn aus der verbesserten Lichterzeugung hinaus, einher mit der wirtschaftlichen Anforderung zur Energieeinsparung. Aus dem daraus resultierenden und sich immer weiter zuspitzendem Zielkonflikt der Forderung nach weniger Aufwand einerseits und angemessen hoher Beleuchtung zur Wahrung der Verkehrssicherheit andererseits besteht der Druck, Beleuchtungsanlagen nur noch auf das Nötigste an mittlerem Beleuchtungsniveau hin zu dimensionieren.

Hierdurch hat sich in der letzten Dekade unter Ausnutzung der bestehenden Normung [CIE 2010A; DIN 2007D; IESNA 2005] bei stetig steigender Effizienz der LED-Technik das Vorgehen entwickelt, ausschließlich dort präzise zu beleuchten, wo es aus Sicht der Sicherheit zwingend erforderlich ist. Dies führte zu einer Determinierung der Lichtverteilungen, da sich in der Aufbauphase der LED-Technologie eine noch fehlende Flexibilität als ein Nachteil der LED-Straßenleuchten gezeigt hat: Weicht die gegebene Installationsgeometrie zu stark vom für diese maßgebenden Ideal ab, kann dies durch den harten Lichtabfall am Rand der beleuchteten Zielfläche zu sicherheitskritischen Effekten führen [SCHADE ET AL. 2009; SCHADE ET AL. 2010; SCHADE & VÖLKER 2011].

Ein Fallbeispiel soll an dieser Stelle nach Abbildung 1.1 illustrieren, wie sich ein gegebener, geringfügig zu großer Lichtpunktstand auf die Qualität der Beleuchtung auswirkt. Die linke Szene zeigt ein Sehobjekt mittig zwischen zwei zu weit auseinander stehenden Leuchten. Der harte Lichtabfall am Rand der gegebenen Lichtverteilung führt dort zu einem dunklen Bereich, welcher das Erkennen des Sehobjektes gegenüber dem Hintergrund erschwert. Der Verkehrsteilnehmer kann das Objekt kaum erkennen. In der rechts gezeigten Szene wurde die ideale

¹ LED, englisch für light-emitting diode, kurz für Leuchtdiode als lichterzeugendes Halbleiterelement. Es werden im Zusammenhang der vorgestellten Untersuchungen ausschließlich LEDs betrachtet, welche weißes Licht emittieren. Farbmetrische Aspekte werden nicht behandelt.

Anlagengeometrie verwendet, so dass sich Objekte auf der Fahrbahn gut vom Hintergrund unterscheiden. Nach DIN EN 13201 erfüllen beide Szenen noch die aktuellen normativen Anforderungen ihrer Beleuchtungsklasse hinsichtlich mittlerer Beleuchtungsstärke und deren Gesamtgleichmäßigkeit. Die normierten Verfahren können solche speziellen Effekte eventuell nicht erfassen, so dass aktuelle Standards kein Garant für ausreichendes Erkennen sind.



Abbildung 1.1: Sehojekte bei unpassend dimensionierter (links) und idealer Beleuchtung (rechts) in der Gesamtszene und vergrößert (gelber Rahmen).

Die Arbeit soll daher aufklären, ob mit anderen Ansätzen eine verbesserte Erkennung erzielt werden kann. Dazu bietet sich eine vergleichende Untersuchung weltweit bekannter Methoden zur Planung und Bewertung von Straßenbeleuchtung an. Ein weiteres Ziel dieser umfassenden Untersuchung ist die Identifizierung des Verbesserungspotentials der betrachteten Methoden. Das Ergebnis kann so durch die Anpassung der aktuellen Standards für Planungs- und Bewertungsverfahren ortsfester Straßenbeleuchtung zu einer permanenten Verbesserung der Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr führen.

1.2 INHALT UND AUFBAU DER ARBEIT

Die Arbeit befasst sich mit der Analyse von Erkennbarkeiten einfacher Sehojekte in Straßenbeleuchtungssituationen, welche durch multikriteriell optimierte Lichtstärkeverteilungskörper ortsfester Anlagen bereitgestellt werden. Die Analyse erfolgt, der ortsfesten Straßenbeleuchtung entsprechend, für niedrige mittlere Leuchtdichten von $0,7 \text{ cd/m}^2 \leq \bar{L} \leq 1 \text{ cd/m}^2$ sowie Niveaus mittlerer horizontaler Beleuchtungsstärken von $10 \text{ lx} \leq \bar{E}_{\text{hor}} \leq 15 \text{ lx}$. Zwar sind diese \bar{E}_{hor} und \bar{L} am unteren Übergang des Geltungsbereiches photopisch adaptierter Beobachtung hin zum mesopischen Sehen [SCHÄFER 2011, S. 44-49], doch erfolgt die Bewertung ortsfester Straßenbeleuchtungsanlagen vorrangig anhand der photopischen Beobachtung [vgl. SCHREUDER 2008, S. 327]. Der Vergleichbarkeit zu anderen Arbeiten halber und aufgrund der Anwendbarkeit der heranzuziehenden etablierten Bewertungsmethoden für die Gütebetrachtung von Straßenbeleuchtung, wie EN 13210, ANSI IESNA RP-8-00 und CIE 115:2010, wird für die Untersuchungen der photopisch adaptierte 2°-Normalbeobachter nach CIE Publikation 41:1978 [CIE 1978] herangezogen. Mesopische und skotopische Beobachtung sind daher nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Die verwendeten Bezeichnungen und Abkürzungen lichttechnischer Ausdrücke orientieren sich weitestgehend am internationalen Wörterbuch der Lichttechnik [CIE 2011]. Die der Übersichtlichkeit und Verständlichkeit dienenden Abweichungen sind im Abkürzungsverzeichnis ab Seite IX angeführt.

Zum Verständnis der Arbeit werden in Kapitel 2 detaillierte Grundlagen zur optimalen Dimensionierung und Bewertung ortsfester Straßenbeleuchtung dargelegt. Insbesondere die Bewertung der Sichtbarkeitsverhältnisse wird hierbei ausführlich erläutert. In Kapitel 3 zur Methodik der Arbeit werden daraufhin elementare Forschungsfragen aus dem hier in Kapitel 1 dargelegten Ziel der Arbeit abgeleitet und in Arbeitshypothesen überführt.

Da bis zum Zeitpunkt dieser Arbeit keine Untersuchungen optimierter LVK in einem derartigen Umfang stattgefunden haben, wird in Kapitel 4 das im Rahmen der Arbeit eigens entwickelte LVK-Optimierungswerkzeug zur Generierung optimierter Lichtstärkeverteilungskörper ausführlich beschrieben.

Die Simulationsergebnisse der LVK-Variation werden in Kapitel 5 ausgewertet und im Kontext der Arbeit diskutiert. Um die Anwendbarkeit der Optimierungen aus den Simulationen zu überprüfen, findet in Kapitel 6 die Validierung durch ein Laborsetup für ausgewählte Beleuchtungssituationen statt. Messunsicherheiten von Optimierung, Simulation und Validierung werden umfassend in Kapitel 7 diskutiert. In Kapitel 8 erfolgt eine Abschätzung der Gültigkeit der Untersuchungsergebnisse, für welche anhand einer ebenfalls in diesem Kapitel behandelten arbeitsübergreifenden Diskussion schließlich in Kapitel 9 belastbare Schlussfolgerungen gezogen werden können. Abschließend erfolgt hier auch der Ausblick, der die Anwendbarkeit der gewonnen Erkenntnisse für zukünftige Forschung und praktische Anwendungen diskutiert.

1.3 BETREUTE WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN

Sowohl die Entwicklung der angewandten Software als auch Teile der Untersuchungen und Validierung des Konzeptes wären in diesem Umfang nicht ohne die tatkräftige Unterstützung einer Reihe studentischer Arbeiten möglich gewesen. Diese, vom Autor betreuten und erfolgreich abgeschlossenen wissenschaftlichen Arbeiten, sind in Tabelle A.2 des Anhangs aufgeführt.

2

WISSENSCHAFTLICHE AUSGANGSSITUATION

Die wissenschaftliche Ausgangssituation gliedert sich, abgesehen von den übergreifenden Berechnungsgrundlagen des Unterkapitels 2.1, in zwei wesentliche thematische Schwerpunkte. Zuerst erläutert Unterkapitel 2.2 die verschiedenen Möglichkeiten der quantitativen Bewertung der visuellen Sicherheit ortsfester Straßenbeleuchtungsanlagen. Unterpunkt 2.3 beschreibt daraufhin den aktuellen Stand der Technik auf dem Gebiet der Optimierung der dafür relevanten Lichtstärkeverteilungskörper. Die Ableitung der Relevanz der Arbeit aus der Darlegung der Ausgangssituation schließt das Kapitel ab.

2.1 ÜBERGREIFENDE BERECHNUNGSGRUNDLAGEN

Hier werden grundlegende Zusammenhänge und Begriffe erläutert, die bei der Optimierung von Lichtverteilungen und Lichtstärkeverteilungskörpern (LVK) und der Analyse ihrer Auswirkungen auf die Erkennbarkeit von Relevanz sind.

2.1.1 LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKÖRPER

Da es in der Anwendung immer wieder zu Missverständnissen bei der Zuordnung der Winkel- und Ebenenbeziehungen bei der LVK-Definition kommt, wird ausdrücklich definiert, dass im Rahmen dieser Arbeit die Konvention des (C, γ) -Koordinatensystems nach DIN EN 13201-3 und CIE Publikation 121 [CIE 1996; DIN 2007F] angewandt wird (siehe Abbildung 2.1). Zu beachten ist, dass sich dieses von den in der IESNA Publikation LM-75-01 [IESNA 2001] getroffenen Konventionen unterscheidet.

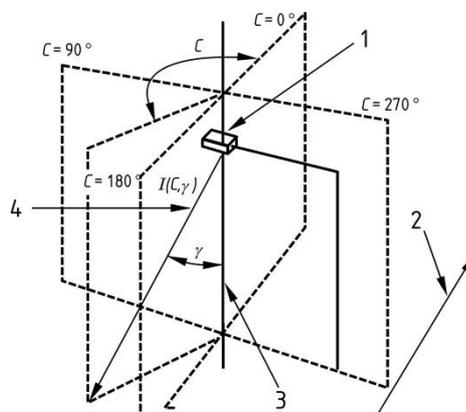


Abbildung 2.1: (C, γ) -System, bezogen auf die Längsrichtung der Fahrbahn [CIE 1996; DIN 2007F].

Nach den Festlegungen der Publikationen CIE 121 und DIN EN 13201-3 gilt:

1	=	Mittelpunkt der Lichtaustrittsfläche
2	=	Längsrichtung der Fahrbahn
3	=	Erste photometrische Achse
4	=	Richtung der Lichtstärke
$C = 0^\circ - 180^\circ$	=	Ebene längs zur Fahrbahn
$C = 270^\circ - 90^\circ$	=	Ebene quer zur Fahrbahn
C	=	Azimut, gemessen an der ersten photometrischen Ebene
γ	=	Vertikaler Winkel, ab der ersten photometrischen Achse

2.1.2 FAHRBAHNDECKSCHICHTEN

Die Untersuchung und Diskussion der Gültigkeiten der in der Praxis etablierten Beschreibung der Eigenschaften und Kategorisierungen der Fahrbahndeckschichten und deren Grundlage soll explizit nicht Bestandteil dieser Arbeit sein. Die Deckschichten sind jedoch ein wesentlicher Bestandteil der Beleuchtungsinstallation, insbesondere bei der Bestimmung von Leuchtdichten und Erkennbarkeiten. Sie sollen daher folgend näher erläutert werden. Für ausführliche Informationen sei auf CIE Publikation 66:1984 [CIE 1984] sowie auf Untersuchungen von SCHMIDT [1987] verwiesen.

Der in der ortsfesten Straßenbeleuchtung wirksame Reflexionsmechanismus in Form der Überlagerung gerichteter Reflexionen an vielen kleinen unterschiedlich orientierten Teiloberflächen der Deckschicht wird durch den Leuchtdichtekoeffizienten q definiert. Er beschreibt die Proportionalität zwischen der unter dem um $1^\circ \pm 0,5^\circ$ geneigtem Beobachtungswinkel bei fest definiertem Beobachterstandort bestimmten Leuchtdichte L und der Summe der horizontalen Beleuchtungsstärken E_{hor} aller den Flächenpunkt P beleuchtenden n Lichtquellen (Leuchten) [KEBSCHULL 1968; SCHMIDT 1987, S. 13; KÖHLER 2011]:

$$L = \sum_{i=1}^n q_i(\gamma_i, \beta_i) \cdot E_{hor,i} \quad \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.1)$$

Abbildung 2.2 illustriert dies für den Fall der Beleuchtung durch eine einzelne Leuchte. Es gilt [vgl. SCHMIDT 1987, S. 13 f.]:

$$L_{P,i} = q(\gamma_i; \beta_i) \cdot E_{hor,i} = q(\gamma_i; \beta_i) \cdot I(\gamma_i; \varphi_i) \frac{\cos^3 \gamma_i}{H^2 \cdot \Omega_0} \quad (2.2)$$

$L_{P,i}$	=	Leuchtdichte i in einem Punkt P auf der Fahrbahnoberfläche
γ_i	=	Ausstrahlwinkel zwischen Z -Achse und der kürzesten Verbindung zwischen Berechnungspunkt und Beobachtungspunkt
q	=	Leuchtdichtekoeffizient
H	=	Lichtpunkthöhe
φ	=	Azimutwinkel des einfallenden Lichts

β = Einstrahlwinkel zwischen Beobachtungsebene vertikaler Ebene der kürzesten Verbindung zwischen Berechnungspunkt und Lichtpunkt

Weiter gilt für reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten:

$$r(\gamma_i; \beta_i) = q(\gamma_i; \beta_i) \cdot \cos^3 \gamma_i \tag{2.3}$$

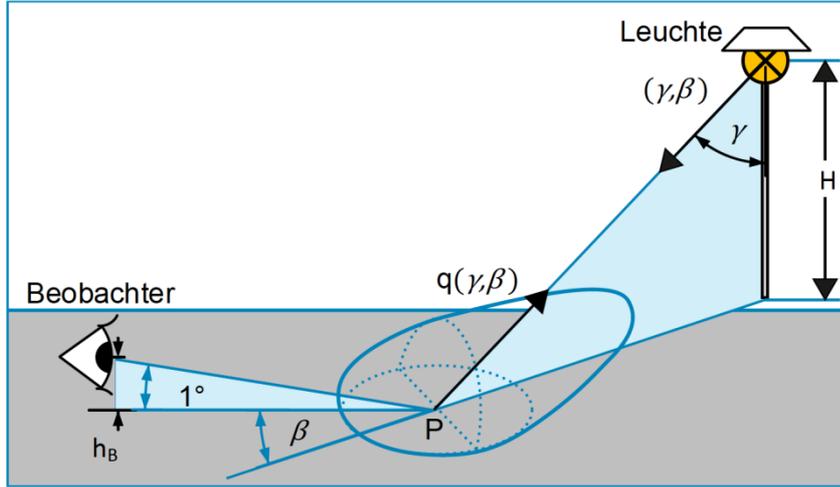


Abbildung 2.2: Darstellung des räumlichen Leuchtdichtekoeffizienten $q(\gamma, \beta)$ der Fahrbahn und Geometrie von Lichteinfall- und Blickrichtung des Beobachters.

Die tabellarische Darstellung der Reflexionseigenschaften der Deckschicht anhand des reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten erfolgt mittels der r -Tabellen. Die r -Tabellen sind anhand des normalisierten mittleren Leuchtdichtekoeffizienten

$$q_0 = \frac{\int q(\gamma; \beta) \cdot d\Omega}{\Omega_0}, \tag{2.4}$$

sowie des Grades der Spiegelung der Deckschicht beschreibenden Spiegelfaktoren $S1$

$$S1 = \frac{r(\tan \gamma = 2, \beta = 0^\circ)}{r(\tan \gamma = 0, \beta = 0^\circ)} \tag{2.5}$$

und $S2$

$$S2 = \frac{q_0}{r(0,0)} \tag{2.6}$$

zusammengestellt. Nähere Informationen hierzu finden sich in HENTSCHEL [2002, S. 223–228] und [SCHMIDT 1987].

Die r -Klassen nach CIE Publikation 66:1984 [CIE 1984] gelten als etablierte Vereinfachung und bilden mit den Arbeiten von unter anderen DE BOER & WESTERMANN [1964A; 1964B], KEBSCHULL [1968], PUSCH [1973], ERBAY [1973], SÖRENSEN [1975], FREDERIKSEN & SÖRENSEN [1976], GIBBONS [1997], DE BOER ET AL. [2009] und YLILEN ET AL. [2010] die umfangreichste Datengrundlage, Eigenschaften von Fahrbahndeckschichten zu abstrahieren. Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass je nach lokal verwendeten Materialien die BRDF² der Deckschichten hinsichtlich ihrer Reflexionsgrade und in ihrer Rauigkeit stark

² Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion, engl. für bidirectional reflectance distribution function.

variieren kann, so dass Abweichungen von bis zu 6 % je r -Wert möglich sind [VAN BOMMEL & DE BOER 1980]. Daher ersetzt keine der Klassen eine individuelle Bestimmung der Reflexionseigenschaften einer individuellen Deckschicht, sondern kann nur als Näherung gesehen werden. Die R- und C-Klassen werden daher hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit, vor allem hinsichtlich ihres q_0 -Wertes und ihres Glanzfaktors S_1 , immer wieder diskutiert [GIBBONS 1997; YLINEN ET AL. 2010]. In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Reflexionstabellen für trockene Fahrbahnen in der Konstellation nach Tabelle 2.1 verwendet. Dabei geht mit steigender Ziffer der Kategorisierung die diffuse Reflexion in eine gerichtete Reflexion über.

Tabelle 2.1: Berücksichtigte Fahrbahndeckschichtklassen [YLINEN ET AL. 2010, S. 80; CIE 1984, S. 70].

Standard-tabelle	Beschreibung der Deckschicht	S_1 -Limit	Standard S_1	Normalisierter q_0 Wert	Anwendung in
R1	Trockener Beton, rau	$S_1 < 0.42$	0.25	0.10	DIN 13201, CIE 66:1984, ANSI / IESNA RP-8-00
R2	Gussasphalt, neu	$0.42 \leq S_1 < 0.85$	0.58	0.07	DIN 13201, CIE 66:1984, ANSI / IESNA RP-8-00
R3	Asphaltfeinbeton, abgefahren	$0.85 \leq S_1 < 1.35$	1.11	0.07	DIN 13201, CIE 66:1984, ANSI / IESNA RP-8-00
R4	Gussasphalt abgefahren	$1.35 \leq S_1$	1.55	0.08	DIN 13201, CIE 66:1984, ANSI / IESNA RP-8-00
C1	ähnlich R1	$S_1 < 0.40$	0.24	0.10	CIE 66:1984
C2	R-Klassen außer R1	$S_1 \geq 0.4$	0.97	0.07	CIE 66:1984

2.1.3 BEOBACHTER UND BEOBACHTUNG

Der Beobachter nimmt bei der Leuchtdichte- und Erkennbarkeitsbewertung die zentrale Empfängerrolle ein. In Unterkapitel 1.2 wurde dieser bereits als photopisch adaptierter 2°-Normalbeobachter festgelegt. Für die Anwendung der r -Tabellen ist dessen Augenhöhe bei 1,50 m über der Straßenoberfläche vorgesehen [SØRENSEN 1975; FREDERIKSEN & SØRENSEN 1976; ERBAY 1973]. Dies resultiert aus der Festlegung des innerhalb eines Bereiches von $1^\circ \pm 0,5^\circ$ gesenkten Beobachtungswinkels bei entsprechender Beobachtungsentfernung.

Bei der Erfassung von Objekt- und Umfeldleuchtdichten zur Bestimmung von Leuchtdichteunterschieden und Objektkontrasten im Verkehrsraum soll in dieser Arbeit zwischen zwei Formen bei der Beobachtung von Objekten unterschieden werden. Die bekannteste Form der Beobachtung ist die stationäre. Sie wird in der aktuellen Europäischen Norm zur ortsfesten Straßenbeleuchtung, der DIN EN 13201 angewandt. Der Beobachter hat dabei eine fixe, „stationäre“ Position (engl. fix position), aus welcher er eine Szene betrachtet. Diese Form der Beobachtung wird bei der Leuchtdichteplanung und -bewertung ebenso verwendet, wie bei der Blendungsbewertung. Im Falle der Bestimmung von Objektkontrasten und Leuchtdichteunterschieden bedeutet dies für eine entsprechende Messreihe entlang der Fahrbahn, dass Beobachter und Sehobjekt, entsprechend der Messpositionen des Objektes, keinen konstanten Beobachtungsabstand aufweisen.

Die dynamische Beobachtung dagegen ist durch einen konstanten Abstand von Beobachter zu Sehobjekt (engl. fix distance) definiert. Für eine Messreihe mit mehreren Objektpositionen entlang des Bewertungsfeldes bewegen sich also Objekt und Beobachter mit konstantem Beobachtungsabstand in dieselbe Richtung³.

2.2 BEWERTUNG DER VISUELLEN QUALITÄT DER STRAßENBELEUCHTUNG

Die ortsfeste Beleuchtung des Verkehrsraumes bei Nacht dient in erster Linie der Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer. Um diese zu gewährleisten, müssen die Verkehrsteilnehmer ihre Sehaufgaben sicher ausführen können. Grundlage dafür ist die visuelle Informationsgewinnung zum Zustand und Verlauf der Straße und allem was sich auf ihr und in nächster Umgebung befindet oder bewegt [vgl. CIE 2010A]. Der visuelle Informationsgewinn ist essentiell für eine sichere Fortbewegung innerhalb des Verkehrsraumes. Andere Verkehrsteilnehmer, Hindernisse sowie der Verlauf von Fahrbahn und Gehwegen, müssen klar erkennbar sein, um Gefahrensituationen zu vermeiden. Damit gehen auch Wohlbefinden und Sicherheitsempfinden einher. Denn je besser eine Situation unter ortsfester Straßenbeleuchtung überblickbar ist und je mehr Klarheit über die Gesamtsituation der Verkehrslage herrscht, desto besser kann das Individuum auf diese reagieren [DIN 2007B; CIE 2010A]. Maßgeblich für Sicherheit und Qualität dieser Beleuchtung sind daher die Sichtverhältnisse, die sie bereitstellt [vgl. ADRIAN & GIBBONS 1993; IESNA 2005]. Aus diesem Anspruch haben sich international vier Maße zur Quantifizierung von Qualität und Sicherheit anhand der Sichtverhältnisse etabliert [ADRIAN & WALTHERT 1975; ADRIAN 1995; CIE 2010A; KOKOSCHKA 1988]:

1. Das Beleuchtungsniveau anhand der mittleren horizontalen Beleuchtungsstärke oder der mittleren Leuchtdichte (siehe Unterpunkt 2.2.1),
2. die Gleichmäßigkeit als Maß der Verteilung von Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte auf der Fahrbahn (siehe Unterpunkt 2.2.2),
3. die Blendung zur Beschreibung der Störeinflüsse der sichtbaren Leuchten und konkurrierender Lichtquellen in unmittelbarer Umgebung (siehe Unterpunkt 2.2.3) sowie
4. die Erkennbarkeit als maßgebliches Kriterium für die Sichtverhältnisse auf der Fahrbahn (siehe Unterpunkt 2.2.4).

³ Diese Definitionen sind nicht zu verwechseln mit denen von REEB [1954], nach welchen sich bei dynamischer Beobachtung „Objekt und Beobachter in dieselbe Richtung, der Beobachter jedoch mit höherer Geschwindigkeit“ [REEB 1954, S. 283], bewegen. Bei seiner zusätzlichen Definition „quasistationärer“ Beobachtung steht der Beobachter still und die Position des Objektes variiert [REEB 1954].

In der Praxis der ortsfesten Straßenbeleuchtung haben sich aus diesen vier Qualitätsmaßen drei wesentliche Methoden zur Dimensionierung und Bewertung ortsfester Straßenbeleuchtungsanlagen durchgesetzt. Dies sind zum einen die unmittelbar mit der Beleuchtung verknüpften Methoden der Beleuchtungsstärke- und der Leuchtdichtebewertung innerhalb einer definierten Bewertungsfläche, kombiniert mit der Blendungsbewertung anhand des Treshold Increment Faktors TI ; zum anderen die über die Kontrastwahrnehmung, Blendung und Adaptation⁴ eines definierten Beobachters verknüpfte Qualitätskennzahl Small Target Visibility (STV) [DIN 2007D; IESNA 2005; CIE 1992; CIE 1981A; CIE 1981B; CIE 2010A].

2.2.1 BEWERTUNG ANHAND DES BELEUCHTUNGSNIVEAUS

Der im Folgenden zusammenfassende Begriff des Beleuchtungsniveaus einer Straße bezieht sich im Kontext dieser Arbeit explizit nicht ausschließlich auf das Niveau horizontaler oder vertikaler Beleuchtungsstärke \bar{E}_{hor} bzw. \bar{E}_{ver} , sondern beschreibt ferner auch das Niveau der Leuchtdichte anhand der mittleren Leuchtdichte \bar{L} . Ein gewisses Beleuchtungsniveau ist essentiell zur Erfüllung der Sehaufgaben der Verkehrsteilnehmer und gilt daher als wesentliches Qualitätskriterium in der Straßenbeleuchtung. Die Bestimmung des Beleuchtungsniveaus durch die horizontale Beleuchtungsstärke E_{hor} ist unkompliziert und von Umgebungseigenschaften nahezu unabhängig. Eine Beleuchtungsplanung nach dieser erfordert kaum mehr als das Wissen über die Eigenschaften der Leuchte, in Form ihrer absoluten Lichtstärkeverteilung, sowie der Geometrie der Installation, welche sich im Wesentlichen aus Mastabstand, Breite der Fahrbahn, Lichtpunkthöhe, dem Überhang der Leuchten und ihrem Anstellwinkel zusammensetzt und folgend bestimmt wird [vgl. BAER 2006; DIN 2007F]:

$$E_{\text{hor}} = \frac{I(\gamma_1, \varphi)}{R^2} \cdot \cos(\gamma_2) \cdot \Omega_0 \quad [\text{lx}] \quad (2.7)$$

$I(\gamma_1, \varphi)$	=	Lichtstärke in [cd], abhängig von der Ausstrahlrichtung
R	=	Abstand des Lichtpunktes zwischen Lichtquelle und Bewertungspunkt in [m]
γ_2	=	Winkel zwischen Lichtstrahl und Flächennormalen [°]
γ_1	=	Winkel zur Charakterisierung der Ausstrahlrichtung [°]
φ	=	Azimutwinkel zwischen Fahrbahnrichtung und Projektion der Ebene zwischen Messpunkt und Lichtquelle in [°]
Ω_0	=	Einheitsraumwinkel, 1 sr

Unter der Berücksichtigung, dass ein Punkt auf der Straße in der Regel durch mehrere Leuchten beleuchtet wird, setzt sich die Gesamtbeleuchtungsstärke in diesem Punkt $E_{\text{hor,ges}}$ aus den n Einzelbeleuchtungsstärken $E_{\text{hor,i}}$ der verschiedenen Leuchten zusammen:

⁴ Damit das visuelle System des Menschen den Leuchtdichtedynamikbereich von 10^{-6} cd/m² bis 10^5 ... 10^6 cd/m² mit maximaler Leistung verarbeiten kann, passt es sich mittels der Veränderung von Pupillengröße, dem Wechsel und Übergang von Zapfen- zu Stäbchensehen und neuronalen und chemischen Anpassungen seiner Empfindlichkeit an das vorherrschende Beleuchtungsniveau an. Diese Anpassung wird als Adaptation beschrieben [vgl. BAER 2006, S. 53; DiLAURA ET AL. 2011]. Für ausführliche Informationen zur Adaptation und dem damit verbundenen Wechsel zwischen photopischem, mesopischem und skotopischem Sehen sei an dieser Stelle an die vergleichend zitierte Fachliteratur [ECKERT 1993; BAER 2006; DiLAURA ET AL. 2011] und hinsichtlich mesopischer Photometrie auf die CIE Publikation 191:2010 [CIE 2010B] verwiesen.

$$E_{\text{hor,ges}} = \sum_{i=1}^n E_{\text{hor},i} \quad [\text{lx}] \quad (2.8)$$

\bar{E}_{hor} ist schließlich das arithmetische Mittel aller N $E_{\text{hor,ges},j}$ auf einer definierten Fläche:

$$\bar{E}_{\text{hor}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_{\text{hor,ges},j} \quad [\text{lx}] \quad (2.9)$$

j = Index der Messpunkte des Messrasters der betrachteten Fläche

Die Bewertung der Qualität der Beleuchtung anhand \bar{E}_{hor} berücksichtigt nicht den Einfluss der Fahrbahndeckschicht [CIE 2010A]. Präzisere Aussagen über die Sichtverhältnisse lassen sich erst mittels der Leuchtdichte L treffen. Denn diese ist maßgeblich für die Helligkeitsempfindung, die das Auge des Beobachters hervorruft [vgl. ADRIAN & WALTHERT 1975, S. 1; vgl. HENTSCHEL 2002, S. 32 f.]. Die weit verbreitete Planung und Bewertung von Beleuchtungsanlagen in Anwohner- und Nebenerschließungsstraßen mittels \bar{E}_{hor} (S-Klassen, entsprechend EN 13201) ist daher mit Vorsicht durchzuführen, da sie bei vergleichbaren Werten zu variierenden Sichtbedingungen führen kann.

Die Verknüpfung einzelner Leuchtdichten der Fahrbahn mit den Einzelbeleuchtungsstärken in einem Punkt erfolgt in der Straßenbeleuchtung anhand des zuvor in Abschnitt 2.1.2 eingeführten Leuchtdichtekoeffizienten q . Dies mag zunächst trivial erscheinen, erfordert jedoch eine umfassende Kenntnis über die Reflexionseigenschaften der Fahrbahndeckschicht. Die mittlere Leuchtdichte \bar{L} bestimmt sich wiederum als arithmetisches Mittel der lokalen Leuchtdichten [DIN 2007F; IESNA 2005] und wird folgend als Leuchtdichteniveau bezeichnet.

Gleichwenn ein Mindestbeleuchtungsniveau essenziell für die Erfüllung der Sehaufgaben eines jeden Verkehrsteilnehmers ist, kann dieser Mittelwert keine ausreichende Information über das Auftreten zu dunkler Bereiche auf der Fahrbahn geben.

2.2.2 BEWERTUNG ANHAND DER GLEICHMÄßIGKEIT

Zusammen mit dem Niveau der Beleuchtungsstärke beziehungsweise der Leuchtdichte ist deren Gleichmäßigkeit auf der Fahrbahn international als Qualitätskennzahl von hoher Relevanz [DIN 2007D; IESNA 2005; CIE 2010A]. Denn eine hohe Ungleichmäßigkeit kann nicht nur Kontrastverflachungen durch die zuvor erwähnten Bereiche besonders niedrigen Beleuchtungsniveaus hervorrufen, sondern anhand der Reaktionsleistung auch zur Ermüdung des Beobachters aufgrund der häufigen Änderung des Adaptationszustandes führen⁵ [vgl. WALTHERT 1973, S. 116 f.; ADRIAN & WALTHERT 1975, S. 19-22]. Darüber hinaus kann sie die blendungsrelevante Schleierleuchtdichte im Auge durch punktuell hohe Leuchtdichten im sonst verhältnismäßig dunkleren Gesichtsfeld negativ beeinflussen [vgl. BAER 2006, S. 87; vgl. NARISADA 1995, S. 126, 128 f.; vgl. NARISADA ET AL. 2003, S. D4-50 f.]. Es soll an dieser Stelle unterschieden werden zwischen Gesamtgleichmäßigkeit U_0 und Längsgleichmäßigkeit U_l :

⁵ Untersuchungen von WALTHERT [1973, S. 77 f.] belegen den negativen Einfluss ungleichmäßiger Fahrbahnbeleuchtung auf die Kontrastempfindlichkeit sowie die Reaktions- und Aktionszeiten von Probanden. Er weist nach, dass bei geringer Gleichmäßigkeit und $\bar{L} = 2 \text{ cd/m}^2$ die gleichen Ergebnisse erzielt werden wie bei homogener Ausleuchtung der Fahrbahn und lediglich $\bar{L} = 0,6 \text{ cd/m}^2$ bzw. $\bar{L} = 0,25 \text{ cd/m}^2$.

$$U_{o,L} = \frac{L_{\min}}{\bar{L}} \quad (2.10)$$

$$U_{o,Ehor} = \frac{E_{hor,\min}}{\bar{E}_{hor}} = g_1 \quad (2.11)$$

L_{\min} = geringste Leuchtdichte innerhalb der bewertungsrelevanten Fläche

$E_{hor,\min}$ = geringste horizontale Beleuchtungsstärke innerhalb der bewertungsrelevanten Fläche

Dementsprechend wird die Gesamtgleichmäßigkeit der vertikalen Beleuchtungsstärke definiert:

$$U_{o,Ever} = \frac{E_{ver,\min}}{\bar{E}_{ver}} \quad (2.12)$$

$E_{ver,\min}$ = geringste vertikale Beleuchtungsstärke innerhalb der bewertungsrelevanten Fläche

\bar{E}_{ver} = arithmetisches Mittel aller berücksichtigten vertikalen Beleuchtungsstärken innerhalb der bewertungsrelevanten Fläche

Die Längsgleichmäßigkeit dient vor allem der Begrenzung des Auftretens heller und dunkler Streifen auf der Fahrbahn und den daraus resultierenden Bereichen kritisch niedriger Leuchtdichten oder Beleuchtungsstärken. Sie berechnet sich für die drei lichttechnischen Größen jeweils aus einer bestimmten Anzahl an Werten entlang der Mittellinie einer Fahrspur. Relevant für die Längsgleichmäßigkeit der gesamten Fahrbahn ist der niedrigste Wert aller betrachteten Fahrspuren [vgl. BAER 2006, S. 87]:

$$U_{l,Ehor} = \frac{E_{hor,\min}}{E_{hor,\max}} = g_2 \quad (2.13)$$

$$U_{l,Ever} = \frac{E_{ver,\min}}{E_{ver,\max}} \quad (2.14)$$

$$U_{l,L} = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \quad (2.15)$$

Mit der Kombination aus Beleuchtungsniveau, Längs- und Gesamtgleichmäßigkeit hat sich in der Straßenbeleuchtung ein wirkungsvolles Bewertungskriterium für Qualität und Sicherheit mit situationsspezifischen Mindestanforderungen etabliert. Doch wie Lichtverteilungen, die die Mindestanforderungen an Gleichmäßigkeit weit übertreffen oder gar nahezu ideal (100 %ige Gleichmäßigkeit) sind, sich wirklich auf die Sicherheit anhand der Erkennbarkeit auswirken, ist nicht eindeutig geklärt. WALTHERT [1973] und ENZMANN [1977] zeigten allerdings, dass auch zu gleichmäßige Verteilungen der Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte einen negativen Einfluss auf das Erkennen von Objekten haben können.

2.2.3 BERÜCKSICHTIGUNG DER BLENDUNG

Bei den in der ortsfesten Straßenbeleuchtung vorherrschenden niedrigen Beleuchtungsniveaus beeinflusst die Blendung die Sehleistung der Verkehrsteilnehmer maßgeblich. Dies kann sich in einer unangenehmen Störfmpfindung, der psychologischen Blendung (engl. discomfort glare) ebenso wie in einer Beeinträchtigung der Sehfunktion, der physiologischen Blendung (engl. disability glare), äußern. Letztere wirkt sich direkt auf die Unterschiedsempfindlichkeit des Beobachters aus. Dieser Einfluss und ihre Bewertung anhand des *TI* werden später ausführlich in Abschnitt 2.2.4.9 beschrieben. Eine eingehende Diskussion der psychologischen Blendung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

2.2.4 BEWERTUNG MITTELS ERKENNBARKEITSORIENTIERTER ANSÄTZE

Eine unmittelbare Bewertung der Straßenbeleuchtungsqualität anhand der Erkennbarkeit findet in den Europäischen Standards bisher keine Anwendung, wird jedoch als Möglichkeit für deren Quantifizierung in der Publikation 115:2010 der Internationalen Beleuchtungskommission CIE [CIE 2010A] angeführt. Die Amerikanische Straßenbeleuchtungsnorm ANSI IESNA RP-8-00 [IESNA 2005] bietet die Möglichkeit der Anwendung des „Small Target Visibility“ (*STV*)-Konzeptes, welches auf der Erkennbarkeit basiert. Dort wird sogar die Möglichkeit gegeben, es als alleiniges Qualitätskriterium der Sichtverhältnisse und damit einhergehender Sicherheit heranzuziehen [ADRIAN & GIBBONS 1993, S. 734; IESNA 2005; CIE 2010A, S. 6 ff.].

Meist wird die Erkennbarkeit mithilfe kleiner Sehobjekte, wie Grautafeln, bestimmt [ADRIAN ET AL. 1993 u. a. in KECK & VICKSBURG 1993; MÉNARD & CARIOU 1992; MENARD ET AL. 1994; DIJON & MALDAQUE 1997; LECOCQ 1999; BACELAR ET AL. 1999A]. Sie wird maßgeblich durch den Kontrast zwischen der Leuchtdichte des Objektes und dessen unmittelbarem sichtbaren Umfeld, das allgemeine Adaptationsniveau des Sehapparates des Beobachters, das Ausmaß der Schleierleuchtdichte (physiologische Blendung) im Auge, die Komplexität des Hintergrundes, die Dynamik der Bewegung (von Objekt und Beobachter) und die Sehleistung der Verkehrsteilnehmer beeinflusst [IESNA 2005; CIE 2010A]. Die Erkennbarkeit wird daher oft als das umfassendste und zugleich komplexeste Qualitätskriterium der Straßenbeleuchtung gesehen. Die ihr zugrunde liegenden Berechnungsgrundlagen basieren unter anderem auf umfangreichen Untersuchungen von ADRIAN [1969, 1989, 1993], BLACKWELL [1946], DUNBAR [1939] und KOKOSCHKA [1989] (siehe auch [CIE 1992]).

Zum besseren Verständnis der späteren Untersuchungsmethodik werden die möglichen Kennzahlen zur Quantifizierung der Erkennbarkeit folgend weiter differenziert. Sie alle haben gemein, die Sichtverhältnisse anhand der Erkennbarkeit von standardisierten Sehobjekten auf der Fahrbahn quantitativ zu bewerten und geben für eine dargebotene Situation präzise Informationen zur Sichtbarkeit. Sie werden allerdings für ihre fehlende Vergleichbarkeit aufgrund der sehr speziellen Beobachtungs- und Darbietungsbedingungen kritisiert.

In den folgenden Abschnitten dieses Unterkapitels werden die Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Erkennbarkeit und deren Einflussparameter, geordnet nach wachsender Komplexität, erläutert.

2.2.4.1 LEUCHTDICHTEUNTERSCHIEDSSCHWELLE

Die ursprünglichste Art zur Beschreibung der Erkennbarkeit von Objekten ist der Leuchtdichteunterschied ΔL zwischen einem Sehobjekt und seinem unmittelbaren Hintergrund:

$$\Delta L = L_o - L_u \quad \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.16)$$

L_o = Leuchtdichte des Sehobjektes in $[\text{cd}/\text{m}^2]$

L_u = Homogene Leuchtdichte der Umgebung in $[\text{cd}/\text{m}^2]$ (auch als Umfeld, Untergrund oder Hintergrund bezeichnet⁶)

Ist ΔL positiv, hebt sich ein helles Objekt von dunklem Hintergrund ab. Ist ΔL negativ, so handelt es sich um ein dunkles Objekt vor hellerem Umfeld.

Die Unterschiedsschwelle ΔL_{th} ist das Ergebnis einer Reihe von Laborexperimenten innerhalb der 1940er bis 1960er Jahre, von welchen hauptsächlich die Arbeiten von BEREK [1943], DUNBAR [1939], BLACKWELL [1946, 1952] und ADRIAN [1969] verbreitet sind. Die Leuchtdichteunterschiedsschwelle soll als elementare Sehfunktion darüber Auskunft geben, wie groß Leuchtdichteunterschiede sein müssen, damit ein definierter Beobachter unter definierten Sehbedingungen (Sehobjektgröße, Darbietungszeit, Wahrnehmungswahrscheinlichkeit, u. a.) ein Objekt vom unmittelbaren Untergrund gerade unterscheiden (identifizieren) kann. Adrian bezeichnet ΔL_{th} als „Schwellenwert der Unterschiedsleuchtdichte, der durch die Helligkeitsempfindung bestimmt wird“ [ADRIAN 1969, S. 2 A]. Aber auch die Bezeichnung Schwellenwert der Unterschiedsleuchtdichte [ENZMANN 1977, S. 7], (Leuchtdichte-) Unterschiedsschwelle und kritischer Leuchtdichteunterschied [ENZMANN 1977; HENTSCHEL 1971; A. BACELAR ET AL. 1999A] sind gängige Bezeichnungen für ΔL_{th} . ADRIAN [1969, S. 5 A] leitet aus empirischen Untersuchungen folgenden theoretischen Zusammenhang entsprechend dem Beispiel in Abbildung 2.3 ab⁷:

$$\Delta L_{\text{th}} = k \left(\frac{\sqrt{\phi}}{\alpha} + \sqrt{L} \right)^2 \quad \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.17)$$

ΔL_{th} = f (Alter des Beobachters, Darbietungszeit, Sehobjektgröße, Kontrastart, Adaptationsleuchtdichte) [VGL. MENARD ET AL. 1994, S. 19]

α = Größe des Seh winkels in [Minuten]

k = Faktor zur Berücksichtigung des Alters

ϕ = Lichtstrom [lm] der Lichtstromfunktion nach ADRIAN [1969, S. 5 A]

Da es häufig zu Verwechslungen bei der Wahl der Hilfsfunktionen $\sqrt{\phi}$ und \sqrt{L} aufgrund unterschiedlicher Geltungsbereiche des heranzuziehenden vorherrschenden Leuchtdichteniveaus kommt, werden folgend die verschiedenen Berechnungswege differenziert. Nach dem ursprünglichen Ansatz von ADRIAN [vgl. 1969, S. 3 A ff.] gilt:

⁶ Sofern keine weitere Differenzierung des Umfeldes und der adaptationsbestimmenden Bereiche im Sichtfeld des Beobachters erfolgt, wird L_u als adaptationsbestimmende Umfeldleuchtdichte angenommen.

⁷ Zur Herleitung über die Riccosche und Webersche Gleichung und zugrunde liegenden Messwerten der Untersuchungen Blackwells sei verwiesen auf [ADRIAN 1969, 2 A-5 A] und [BLACKWELL 1946].

1. Für $L_u \geq 2,59 \text{ cd/m}^2$:

$$\log \sqrt{\Phi} = -2,059 + 0,343 \cdot \log L_u \quad (2.18)$$

$$\log \sqrt{L} = -3,382 + 0,643 \cdot \log L_u - 0,0475(\log L_u)^2 \quad (2.19)$$

2. Für $L_u \leq 0,00418 \text{ cd/m}^2$:

$$\log \sqrt{\Phi} = -1,972 + 0,173 \cdot \log L_u \quad (2.20)$$

$$\log \sqrt{L} = -2,891 + 0,5275 \cdot \log L_u + 0,0227(\log L_u)^2 \quad (2.21)$$

3. Für $0,00418 \text{ cd/m}^2 \leq L_u \leq 2,59 \text{ cd/m}^2$:

$$\log \sqrt{\Phi} = -2,072 + 0,3372 \cdot \log L_u + 0,0866(\log L_u)^2 \quad (2.22)$$

$$\log \sqrt{L} = -3,256 + 0,319 \cdot \log L_u \quad (2.23)$$

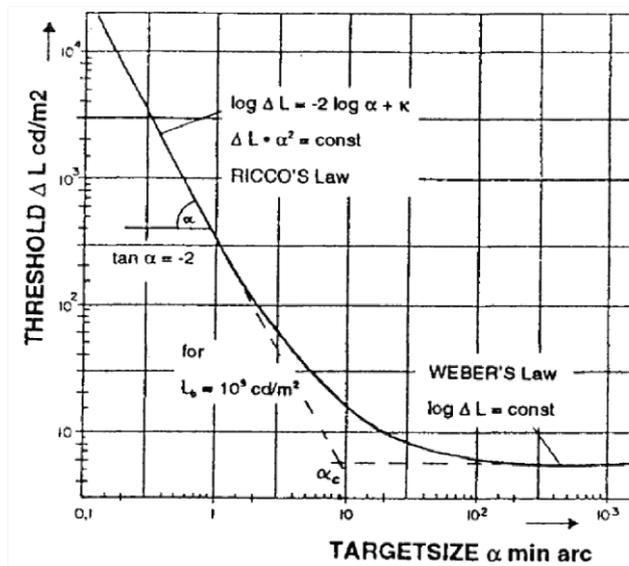


Abbildung 2.3: Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL_{th} als Funktion des Seh winkels α bei eine konstanten Umfeldleuchtichte von $L_u = 10^3 \text{ cd/m}^2$ als Überlagerung der Funktionen von Weber und Ricco nach ADRIAN [vgl. 1993, S. 18].

Eine angepasste Variante zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle nach den Gleichungen (2.18) bis (2.23) gibt ADRIAN [vgl. 1989, S. 182] alternativ wie folgt an:

1. Für $L_u \geq 0,6 \text{ cd/m}^2$:

$$\sqrt{\Phi} = (\log 4,1925 \cdot L_u^{0,1556}) + 0,1684 \cdot L_u^{0,5867} \quad (2.24)$$

$$\sqrt{L} = 0,05946 \cdot L_u^{0,466} \quad (2.25)$$

2. Für $L_u \leq 0,00418 \text{ cd/m}^2$:

$$\log \sqrt{\Phi} = 0,028 + 0,173 \cdot \log L_u \quad (2.26)$$

$$\log \sqrt{L} = -0,891 + 0,5275 \cdot \log L_u + 0,0227(\log L_u)^2 \quad (2.27)$$

3. Für $0,00418 \text{ cd/m}^2 \leq L_u \leq 0,6 \text{ cd/m}^2$:

$$\log \sqrt{\Phi} = -0,072 + 0,3372 \cdot \log L_u + 0,0866(\log L_u)^2 \quad (2.28)$$

$$\log \sqrt{L} = -1,256 + 0,319 \cdot \log L_u \quad (2.29)$$

Diese Aufteilung findet ebenso in der Implementierung des im folgenden Abschnitt 2.2.4.11 ausführlich beschriebenen Visibility-Konzeptes im ANSI IESNA RP-8-00-Standard Anwendung und ist nicht mit der als Erstes beschriebenen, ursprünglichen Aufteilung nach ADRIAN [1969, S. 2 A ff.] zu verwechseln. Jedoch sind hier nochmals Anpassungen für 1.) vorgenommen worden [IESNA 2005, S. 23]:

1. Für $L_u \geq 0,6 \text{ cd/m}^2$:
- $$\sqrt{\Phi} = (\log 4,2841 \cdot L_u^{0,1556}) + 0,1684 \cdot L_u^{0,5867} \quad (2.30)$$
- \sqrt{L} bleibt unverändert

Dabei wird $L_u = L_{ad,RP}$ als adaptationsbestimmend vorausgesetzt. Die adaptationsbestimmende Umfeldleuchtdichte $L_{ad,RP}$ setzt sich additiv aus direkter Umfeldleuchtdichte $L_{unt,RP}$ und Schleierleuchtdichte im Auge des Beobachters $L_{s,\ddot{a}q}$ zusammen:

$$L_{ad,RP} = L_{unt,RP} + L_{s,\ddot{a}q} \quad (2.31)$$

mit

$$L_{unt,RP} = \frac{L_{unt1,RP} + L_{unt2,RP}}{2} \quad (2.32)$$

nach Abbildung 2.4:

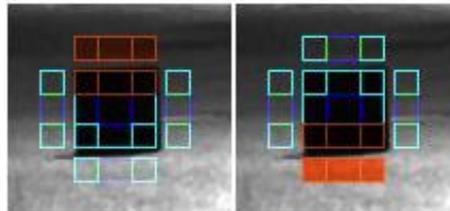


Abbildung 2.4: Leuchtdichtebereiche zur Bestimmung der mittleren Untergrundleuchtdichte $L_{unt,RP}$ nach ANSI IESNA RP-8-0. Untergrundleuchtdichte der oberen Objektkante $L_{unt1,RP}$ (orange gefüllt links) und Untergrundleuchtdichte der unteren Sehobjektkante $L_{unt2,RP}$ (orange gefüllt, rechts) [FRANKE 2012, S. 47].

Eine umfassende Übersicht zur Thematik der äquivalenten Schleierleuchtdichte in Interaktion mit der Adaptationsleuchtdichte gibt VÖLKER [2006, S. 14-21]. Die Thematik wird auch in der folgenden Passage 2.2.4.2 sowie in den Unterkapiteln 4.4 und 4.5 aufgegriffen.

2.2.4.2 RELEVANTE LEUCHTDICHTEN

An dieser Stelle ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass zur Bestimmung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle unterschiedliche Bereiche für die einzelnen zur Berechnung verwendeten Leuchtdichten herangezogen werden können.

Bei der einfachen Präsentation homogener Sehobjekte auf einem ebenfalls homogenen Umfeld wird keine Einschränkung der Fläche zur Bestimmung der Umfeldleuchtdichte getroffen. Die Präsentation von Sehobjekten in der Straßenbeleuchtung erfordert, aufgrund der inhomogenen Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld des Beobachters, jedoch eine differenzierte Betrachtung der kontrastbestimmenden Untergrundleuchtdichte, die das Sehobjekt unmittelbar umgibt. Daher bezieht sich die Hintergrundleuchtdichte im Gegensatz zur Untergrundleuchtdichte nicht auf den Bereich unmittelbar um das Sehobjekt herum, sondern auf Bereiche, die den Untergrund weiträumig umschließen. Zu ihrer Bestimmung wird meist über einen großflächigen

Bereich im Gesichtsfeld des Beobachters arithmetisch gemittelt. Typische Bereiche hierfür sind z. B. die Fahrbahn, das gesamte Gesichtsfeld des Fahrers oder ein großräumiger Ausschnitt des Gesichtsfeldes, der den Bereich der durch eine Kfz-Windschutzscheibe zu sehenden Umgebung repräsentiert. In dieser Arbeit wird der Hintergrund mit dem Umfeld gleichgesetzt, so dass bei differenzierter Betrachtung ausschließlich nach der Untergrundleuchtdichte L_{unt} beziehungsweise L_{unt} und der Umfeldleuchtdichte L_{umf} unterschieden wird. Bei Berücksichtigung von Adaptations- und Blendungsprozessen entspricht die dafür relevante adaptionsbestimmende Leuchtdichte L_{ad} der Umfeldleuchtdichte nach Abbildung 2.5.

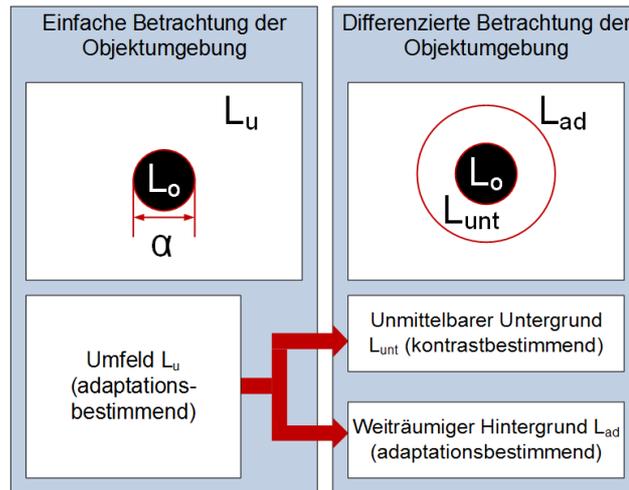


Abbildung 2.5: Gegenüberstellung der einfachen Betrachtung der Objektumgebung [BLACKWELL 1946; ADRIAN 1969] und der differenzierten Betrachtung nach KOKOSCHKA [1988].

Die Komplexität des Umfeldes bildet eine weitere Einflussgröße auf die Erkennbarkeit von Objekten. Untersuchungen von PAULMIER ET AL. [2001] zum Einfluss der Hintergrundstruktur auf die Erkennbarkeit zeigen den Zusammenhang zwischen der Erkennbarkeit von Objekten auf der Fahrbahn und der Komplexität des Hintergrundes, der sie umgibt. Sie fanden heraus, dass die Komplexität des Gesichtsfeldes einen maßgeblichen Einfluss auf die Erkennbarkeit von Sehobjekten hat. Über welchen Sichtbereich sich das Sichtfeld eines Verkehrsteilnehmers erstreckt, ist aktuell umstritten. Der ANSI IESNA RP-8-00 beruft sich in Annex C.2.3 auf unveröffentlichte Daten von Adrian et al, nach welchen 75 % aller Kfz-Führer aufgrund der Karosserie eine Begrenzung des Sichtfeldes 25° oberhalb der Horizontalen vorfinden würden. Fußgänger und Radfahrer ohne Helm hätten eine Abschattung durch die Augenbrauenpartie von 45° über der Horizontalen [IESNA 2005].

2.2.4.3 SEHOBJEKTEEIGENSCHAFTEN

Die meisten Untersuchungen und Berechnungsmethoden zur Quantifizierung der Erkennbarkeit befassen sich mit einfachen Sehobjekten. „Unter einfach aufgebauten Sehobjekten werden [...] Objekte verstanden, die sich durch zwei Leuchtdichten kennzeichnen lassen, nämlich die Objektleuchtdichte und die Umfeldleuchtdichte“ [KOKOSCHKA 1988, S. 305]. Das so abstrahierte Sehobjekt muss einen Reflexionsgrad aufweisen, welcher realen Objekten auf der Fahrbahn entspricht.

Viele Untersuchungen zur Erkennbarkeit [u. a. HENTSCHEL 1971; ENZMANN 1977, S. 69 f.; WASSILEV 1982] orientieren sich in der Wahl des ihnen zugrunde liegenden Sehobjekt-

reflexionsgrades an der Häufigkeitsverteilung der Kleidungsreflexionsgrade nach GOLDMANN [1956B] entsprechend Abbildung 2.6

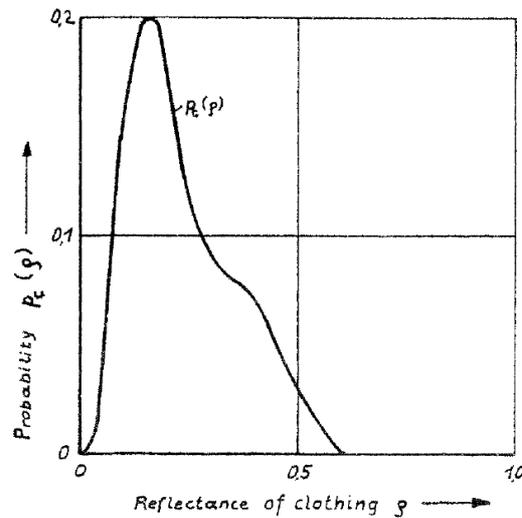


Abbildung 2.6: Goldmann-Häufigkeitsverteilung von Reflexionsgraden typischer Fußgängerbekleidung nach [ENZMANN 1977, S. 70].

Je nach Saison geben KOSMATKA [2003, S. 550] und BHISE ET AL. [1977] typische Reflexionsgrade für die Kleidung von Fußgängern von $\rho_o = 0,1$ an. Für die Beinkleidung unterhalb des Knies liegt der Reflexionsgrad nach KOSMATKA [2003, S. 550] jedoch saisonbedingt bei lediglich $\rho_o = 0,05$. Das im Unterkapitel 2.2.4.13 beschriebene „Revealing Power“ Bewertungsprinzip legt die Arbeit von SMITH [1938] zur statistischen Verteilung von Sehobjektreflexionsgraden zugrunde und verwendet die Ergebnisse nach Abbildung 2.7, um die Wahrscheinlichkeit des Erkennens von Objekten nach Sehobjektreflexionsgrad zu beschreiben.

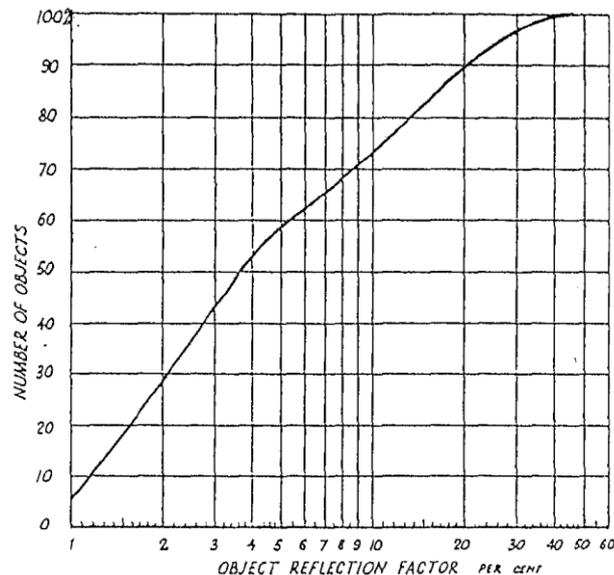


Abbildung 2.7: Kumulative Wahrscheinlichkeit zum Erkennen von Objekten in Abhängigkeit des Sehobjektreflexionsgrades für Negativkontraste nach SMITH [1938; WALDRAM 1938, S. 138].

Entsprechend der Kumulation dieser Erkennbarkeitswahrscheinlichkeiten über den Sehobjektreflexionsgrad basieren seither viele Untersuchungen zur Erkennbarkeit ebenso wie die ursprünglichen Empfehlungen der IESNA vor dem RP-8-00 auf einem Sehobjektreflexionsgrad

von um die 20 % als Worst-Case Szenario für Objekte auf der Fahrbahn. Auch ADRIAN ET AL. [ADRIAN ET AL. 1993; ADRIAN & GIBBONS 1993] definieren $\rho_o = 0,25$ bis $\rho_o = 0,3$ als Referenz-Reflexionsgrad für die Berechnung der Erkennbarkeit von Sehobjekten in der Straßenbeleuchtung. Denn – so dieser häufig gewählte Argumentationsansatz – wenn ein Objekt mit einem niedrigen Reflexionsgrad erkannt wird, würden Objekte höherer Reflexionsgrade leichter erkannt werden [vgl. GIBBONS 1997, S. 11 f.]. Hier besteht jedoch eine essenzielle, nicht zu vernachlässigende Einschränkung: Die Argumentation gilt nur für Negativkontraste.

Die aktuelle US-Amerikanische Richtlinie „American National Standard Practice for Roadway Lighting, ANSI/IESNA RP-8-00“, aus dem Jahr 2000, [IESNA 2005] verweist zwar darauf, dass in der Forschung [KECK & VICKSBURG 1993] meist niedrigere Reflexionsgrade verwendet werden. Die im Standard inbegriffene *STVL*-Methode wendet im Gegensatz dazu allerdings einen Objektreflexionsgrad von $\rho_o = 50\%$ an. Nach GIBBONS [vgl. 1997, S. 11 f.] liegt diese Entscheidung in den Untersuchungen von MACE [1997] begründet, nach welchen mit diesem Reflexionsgrad berechnete *STV* näher an realen Unfallzahlen lägen als *STV*, die mit $\rho_o = 20\%$ Sehobjekten berechnet würden [vgl. GIBBONS 1997, S. 12].

Oft berücksichtigen Forschungen zur Erkennbarkeit daher mehrere Reflexionsgrade, um eine bessere Allgemeingültigkeit, losgelöst von der Kontrastart zu erreichen. So konzentriert sich z. B. Wassilev bei seinen Untersuchungen zur „Optimierung der Straßenbeleuchtung auf der Grundlage der Kontrastwiedergabe“ [WASSILEV 1982, S.123] auf Reflexionsgrade von $\rho_o = 5\%$ und $\rho_o = 45\%$. Für ihren Ansatz einer LVK-Optimierungsmethode verwenden LEZCZYNSKA & KURZAWA [1990] als kritisches Sehobjekt eine Grautafel mit $\rho_o = 20\%$ einer Größe von 20 cm x 20 cm. DIJON & JUSTIN [1998] entschieden sich in ihren Untersuchungen zur Erkennbarkeit für Graukarten mit Reflexionsgraden von $\rho_o = 24\%$, $\rho_o = 31\%$ und $\rho_o = 38\%$ als Auszug ihrer Voruntersuchungen mit $\rho_o = 15\%$ bis $\rho_o = 40\%$. Die Diskussion, welcher Reflexionsgrad reale Objekte am besten repräsentiert und idealerweise der Ermittlung von Sehobjekterkennbarkeiten zugrunde liegen sollte, dauert noch immer an.

Neben dem Reflexionsgrad wird ein Sehobjekt über seine Form und Größe definiert. Die Objektgröße ist von signifikanter Bedeutung für die Bestimmung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle und in Folge dessen für die Erkennbarkeit des Objektes [vgl. VÖLKER 2006, S. 60]. Viele allgemeine Laboruntersuchungen zur Leuchtdichteunterschiedsschwelle oder zum Schwellenkontrast verwendeten flache runde Sehobjekte [u. a. BLACKWELL 1946; BLACKWELL 1952; ADRIAN 1989; ADRIAN 1969]. Die meisten Untersuchungen zur Erkennbarkeit von Sehobjekten in der Straßenbeleuchtung wenden deren Erkenntnisse jedoch auf flache eckige Sehobjekte an oder nutzen von vornherein eckige Sehobjekte [U. A. ADRIAN 1995; HENTSCHEL 1969; DIJON & JUSTIN 1998; REEB 1954; REEB & SCHLEISS 1956; ENZMANN 1977].

Die Wahl der Größe orientiert sich meist entweder an der Größe von für den Kfz-Verkehr gefährlichen Objekten oder am unteren Beinbereich von Fußgängern⁸. Dies abstrahieren u. a. Untersuchungen von LESZCZYNSKA & KURZAWA [1990], DIJON & JUSTIN [1998] und ADRIAN & GIBBONS [1993, S. 734] sowie Normen im Bereich der Straßenbeleuchtung mit einer Standard-Objektgröße von circa 20 cm⁹ [IESNA 2005].

LECOCQ [1991; 1997; 1999] untersuchte mehrfach die Erkennbarkeit von halbsphärischen Sehobjekten als Repräsentation realer, plastischer Sehobjekte. DIJON UND MALDAQUE [1997] sowie DIJON UND JUSTIN [1998] verglichen die Erkennbarkeiten flacher Graukarten von 20 cm x 20 cm Kantenlänge mit sphärischen Sehobjekten eines Durchmessers von 20 cm, jeweils bei Reflexionsgraden von $\rho_o = 0,24$, $\rho_o = 0,31$ und $\rho_o = 0,38$ in einer Simulationsumgebung und auf einer realen Teststrecke mit verschiedenen Beleuchtungsinstallationen. Die Beobachtungen zeigten, dass es wesentlich schwerer ist, ein sphärisches Sehobjekt verschwinden zu lassen als eine typische Graukarte, da der Innerobjektcontrast bei den sphärischen Sehobjekten zur besseren Sichtbarkeit führt. Flache Objekte weisen diesen Effekt nicht auf. Bezogen auf den Objektcontrast im Rahmen der verwendeten „Visibility Level“-Berechnungsmethode nach ANSI IESNA RP-8-00 für die Bewertung einer gesamten Beleuchtungsinstallation, bringt keines der beiden Objekte einen entscheidenden Vorteil. Teils sind sphärische Objekte an Stellen, an denen bereits flache Objekte bereits nicht mehr sichtbar sind, noch schwach erkennbar, und an Stellen, an denen flache Objekte erkennbar sind, sind auch die sphärischen klar erkennbar. Daher gilt für Dijon und Justin das flache Sehobjekt gegenüber dem sphärischen als das kritischere Objekt [vgl. DIJON & JUSTIN 1998, S. 141].

BACELAR ET AL. [1999A] stützten diese Erkenntnisse, indem sie flache und hemisphärische Sehobjekte hinsichtlich ihrer Erkennbarkeit unter sonst gleichen Sehbedingungen untersuchten. Ihre Ergebnisse zeigten zwar keine vollkommen identischen Regressionsgeraden für den Probandenversuch mit flachem Sehobjekt und dem mit sphärischem Sehobjekt, konnten jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Ratingergebnissen ableiten. Die Eigenschaft hemisphärischer Sehobjekte, hohe Leuchtdichteunterschiede auf dem Objekt zu haben, stellt sich darüber hinaus zur Bestimmung der Objektleuchtdichte als problematisch heraus. Denn eine vereinfachte Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Leuchtdichte der angestrahlten und schattigen Objektbereiche ist nicht ohne weiteres möglich. Lediglich ein verallgemeinernder Ansatz des Verlaufes der Bereiche höherer Leuchtdichte auf der angestrahlten Seite des Objektes hin zu den Bereichen niedriger Leuchtdichten auch der verdunkelten Objektseite ist möglich [BACELAR ET AL. 1999A]. Ein direkter Vergleich zwischen den Methoden von ADRIAN [1989] und LECOCQ [1991] ist also nur mittels eines Probandenversuchs zur Erkennbarkeit der beiden Objektarten sinnvoll. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass aufgrund des „luminous gradient“ auf den Kugeln die Erkennbarkeit bei niedrigen Visibility Levels besser war als bei den flachen Sehobjekten. Die Graukarten schnitten dagegen bei mittleren und höheren Visibility Levels (>10) besser ab. Daraus folgt, dass gerade bei

⁸ KOSMATKA [2003] verwendet ein ca. 1860 cm² großes Rechteck, dessen vertikaler Mittelpunkt 33 cm unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze eines Kfz-Abblendlichtes liegt. Da es vertikal den Bereich der Beine eines Fußgängers abdeckt und 2 Quadrat-Fuß groß ist, ergibt sich bei einer Montagehöhe von Standard-Kfz-Scheinwerfern ein 1 Fuß (30,48 cm) breites und 2 Fuß (60,96 cm) hohes Sehobjekt mit vertikalem Mittelpunkt auf 32,00 cm Höhe. Dies kann angenommen werden als ein Sehobjekt, dass auf dem Boden steht, 1 Fuß breit und 2 Fuß hoch ist [vgl. KOSMATKA 2003, S. 552].

⁹ RP-8-00 definiert für ein Standardsehobjekt der Größe 0,18 m · 0,18 m mit einem Sehwinkel $\alpha = 7,47$ min bei 83,07 m Beobachtungsentfernung [IESNA 2005, S. 23].

niedrig beleuchteten Straßen geringer VL -Werte (<10) die flachen Sehobjekte als die für die Erkennbarkeit kritischeren zu sehen sind [vgl. BACELAR ET AL. 1999A, S. 179].

Die Objektleuchtdichte setzt sich aus zwei wesentlichen Komponenten zusammen. Dies ist zum einen die von der Leuchte her rührende direkte Leuchtdichte und zum anderen die Leuchtdichte, die durch Reflexion von der Fahrbahn auf das Objekt verursacht wird. Für die Leuchtdichte L_o eines Sehobjektes mit diffus reflektierender Oberfläche gilt entsprechend Abbildung 2.8 nach dem Lambertschen Gesetz [vgl. ADRIAN 1995, S. 825]:

$$L_o = \frac{(E_{o,direkt} + E_{o,indirekt}) \cdot \rho_o}{\pi} \quad (2.33)$$

$E_{o,direkt}, E_{o,indirekt}$ = Vertikale Beleuchtungsstärke auf dem Sehobjekt, direkter und indirekter Anteil

ρ_o = Reflexionsgrad des Sehobjektes

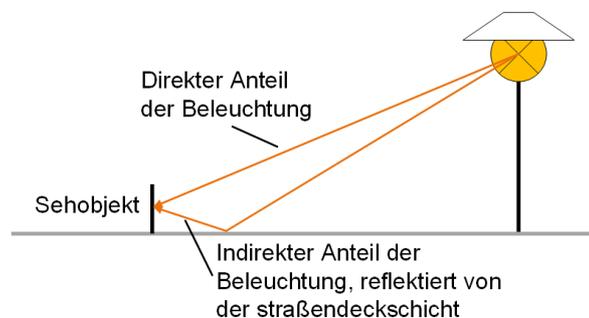


Abbildung 2.8: Direkte und indirekte Anstrahlung des Sehobjektes.

Falluntersuchungen von ADRIAN [1995, S. 825 f.] haben gezeigt, dass der indirekte Anteil der Objektleuchtdichte bei Negativkontrasten entscheidenden Einfluss auf die Gesamtsehobjektleuchtdichte haben kann. In bestimmten Konstellationen von Geometrie, Sehobjekt- und Fahrbahndeckschichtcharakteristik hat die Berücksichtigung des Indirektanteils an manchen Fahrbahnrorten fast zu einer Halbierung des VL geführt. Erste Ergebnisse sind in [ADRIAN 1995] und [ADRIAN & GIBBONS 1993] veröffentlicht. Sie beschränken sich jedoch auf eine exemplarische Installationsgeometrie und R3-Fahrbahndeckschichtcharakteristik. Gibbons diskutiert diese Thematik ausführlich in [GIBBONS 1997].

2.2.4.4 WAHRNEHMUNGSWAHRSCHEINLICHKEIT

Bei der Wahrnehmung von Sehobjekten wird allgemein unterschieden zwischen der Detektion eines Sehobjektes und der Identifikation eines Sehobjektes. Während für die Detektion eines Sehobjektes eine Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von $p = 50\%$ angenommen wird (das Objekt gilt als „gerade gesehen“), wird der Identifikation eines Objektes eine Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von $95\% \leq p < 100\%$ zugrunde gelegt (das Objekt gilt als „sicher gesehen“) [vgl. KOKOSCHKA 1988; VÖLKER 2006]. Bei sonst gleichbleibenden Sehbedingungen führt ein kontinuierliches langsames Erhöhen der Umgebungsleuchtdichte bei Negativkontrast zu einer kontinuierlichen, nicht sprunghaften Zunahme der Wahrnehmungswahrscheinlichkeit.

Zu beachten ist deshalb, dass Blackwell und Berek unterschiedliche Wahrnehmungswahrscheinlichkeiten verwenden: Berek nahezu 100% und Blackwell 50% . Daher ist eine

Anpassung der Schwellenwerte mit einem Korrekturfaktor nötig. Enzmann empfiehlt die Schwellenwerte Blackwells mit dem Faktor $k_p = 3,1$ zu multiplizieren, damit die nach Blackwell folgenden Kurven gut mit denen nach Berek zusammenfallen, so dass der Zusammenhang nach Gleichung (2.17) auf Seite 13 für eine Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von nahezu 100 % gilt, wenn er mit k_p multipliziert wird [vgl. ENZMANN 1977, S. 8-11].

Diesen Unterschied zwischen den Untersuchungen von Berek und Blackwell bestätigt Kokoschka. Er beziffert die Abweichung auf einen Faktor von etwa 3 bis 4 und vermutet den Unterschied in der Qualität der Versuchsbedingungen [vgl. KOKOSCHKA 1988, S. 306]. ADRIAN [ADRIAN & GIBBONS 1993, S. 735; WERNER ADRIAN 1993, S. 25] gibt für Gleichung (2.17) den Faktor mit $k_p = 2,6$ für 99,9 % Wahrnehmungswahrscheinlichkeit an. Dieser Faktor hat sich bei den angrenzenden Forschungen seit den 1990er Jahren, auf welche die vorliegende Arbeit Bezug nimmt, durchgesetzt.

Zwar gibt es nach HENTSCHEL [1971] erweiterte Untersuchungen zur Betrachtung bewegter Sehobjekte und Vergleiche mit dem „Revealing Power“-Ansatz nach Unterkapitel 2.2.4.13, doch werden diese aufgrund der Betrachtung unbewegter Objekte innerhalb der hier vorgestellten Untersuchungen nur erwähnt und nicht angewandt. Hentschel gibt die Leuchtdichteunterschiedsschwelle auf Basis seiner Probandenversuche mit

$$\Delta L_{\text{th,Hentschel}} = 0,38 \cdot \bar{L}_{\text{Str}}^{0,87} \quad (2.34)$$

an. Dabei ist

\bar{L}_{Str} = die mittlere Fahrbahnleuchtdichte, innerhalb seiner Untersuchungen.

2.2.4.5 KONTRASTPOLARITÄT

Leuchtdichteunterschiede können in zweierlei Weise auftreten. Dunklere Objekte vor hellerem Umfeld rufen negative Werte für ΔL hervor, was folgend als Negativkontrast oder als Silhouette bezeichnet wird. Hellere Objekte vor dunklerem Umfeld rufen aufgrund ihrer positiven Werte für ΔL und dementsprechend einen Positivkontrast hervor, also eine Non-Silhouette.

Die Unterschiedsschwellen von Positivkontrasten nehmen unter sonst gleichen Bedingungen andere Werte an als die von Negativkontrasten. Dunklere Objekte sind allgemein leichter vor hellem Hintergrund zu detektieren als helle Objekte vor dunklerem Hintergrund [IESNA 2005; KOKOSCHKA 1988; ADRIAN ET AL. 1993; ADRIAN & GIBBONS 1993; ADRIAN 1995; AULHORN 1964]. Wenn hinsichtlich der Erkennbarkeit ausschließlich über die Beträge von ΔL und ΔL_{th} argumentiert werden soll, so muss dieser Effekt mittels eines Korrekturfaktors, dem Kontrastpolaritätsfaktor F_{CP} , ausgeglichen werden:

$$|\Delta L_{\text{neg}}| = |\Delta L_{\text{pos}}| \cdot F_{\text{CP}} \quad (2.35)$$

Da explizit die negativen Werte mit dem Faktor multipliziert werden, wird vom Negativkontrast-Korrekturfaktor gesprochen [ADRIAN 1989, S. 183; IESNA 2005, S. 23 f.]:

$$F_{\text{CP}}(\alpha, L_{\text{ad}}) = 1 - \frac{m \cdot \alpha^{-0,6 \cdot L_{\text{ad}}^{-0,1488}}}{2,4 \cdot \Delta L_{\text{pos,t=2s}}} \quad (2.36)$$

mit

t	=	Darbietungszeit,
α	=	Blondel-Rey-Konstante.

Wenn L_u adaptationsbestimmend ist, werden drei Adaptationsbereiche berücksichtigt:

$$1. \quad L_u \geq 0,1 \text{ cd/m}^2: \quad \log m = -10^{-(0,125(\log L_u + 1)^2 + 0,0245)} \quad (2.37)$$

$$2. \quad L_u \leq 0,004 \text{ cd/m}^2: \quad F_{CP}(\alpha, L_{ad}) = 0,5, \quad (2.38)$$

da m hier nicht berechnet werden muss.

$$3. \quad 0,004 \text{ cd/m}^2 < L_u < 0,1 \text{ cd/m}^2: \quad \log m = -10^{-(0,075(\log L_u + 1)^2 + 0,0245)} \quad (2.39)$$

2.2.4.6 DARBIETUNGSZEIT

Die Dauer der Darbietung t eines Sehobjektes hat ebenfalls einen Einfluss auf die Leuchtdichteunterschiedsschwelle. Sie wird in den Modellen zur Schwellenbestimmung im Allgemeinen mit $t \geq 2$ s festgelegt. Meist wird diese Darbietungsdauer bereits als „unendliche“ Darbietungszeit angesehen [vgl. u. a. BLACKWELL 1946, S. 639; ADRIAN 1989, S. 182; ENZMANN 1977, S. 15-22; NARISADA 1995]. Oft werden auch $0,1 \text{ s} \leq t \leq 1 \text{ s}$ betrachtet, um den Einfluss von t kritisch zu untersuchen [vgl. ENZMANN 1977, S. 15-22; NARISADA 1971; NARISADA & YOSEOIKAWA 1974, S. 14]. ADRIAN & GIBBONS [vgl. 1993, S. 735] diskutieren den Einfluss der nach NARISADA & YOSEOIKAWA [1974] und ZWAHLEN [1985] zu durchschnittlichen Fixationszeiten eines Kfz-Fahrers von 0,2 s bei Tag und 0,35 s bei Nacht. Nach ihnen können die Schwellenwerte für Tagsehen auch nachts angewendet werden. Bei einem nächtlichen Leuchtdichteniveau von 0,5 bis 2 cd/m^2 verringert daraufhin die verlängerte Beobachtungszeit allerdings den jeweiligen Schwellenwert auf 83 % - 85 % des entsprechenden Wertes für Tagsehen. Das Modell von Adrian zur Bestimmung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle nach den Formeln (2.16) bis (2.32) gilt für $t \geq 0,2$ s. Im ANSI IESNA RP-8-00 [IESNA 2005, S. 24] ist t mit 0,2 s festgelegt. Kürzere Darbietungszeiten bewirken höhere Schwellenwerte und werden nach ADRIAN [1989, S. 82] in Gleichung (2.17) wie folgt berücksichtigt:

$$\Delta L_t = \Delta L_{t=2s} \frac{a(\alpha, L_u) + t}{t} \quad (2.40)$$

t	=	Tatsächliche Dauer der Darbietung des Sehobjektes
-----	---	---

$a(\alpha, L_u)$ wird berechnet nach:

$$a(\alpha) = 0,36 - 0,0972 \frac{\alpha_{\text{const}}^2}{\alpha_{\text{const}}^2 - 2,513 \cdot \alpha_{\text{const}} + 2,7895} \quad (2.41)$$

$$a(L_u) = 0,355 - 0,1217 \frac{L_{u,\text{const}}^2}{L_{u,\text{const}}^2 - 10,4 \cdot L_{u,\text{const}} + 52,28} \quad (2.42)$$

mit

$$\alpha_{\text{const}} = \log \alpha + 0,523 \quad (2.43)$$

und

$$L_{u,\text{const}} = \log L_u + 6 \quad (2.44)$$

Für $\alpha < 60'$ gilt durch Approximation:

$$a(\alpha, L_u) = \frac{\sqrt{a(\alpha)^2 + a(L_u)^2}}{2,1} \quad (2.45)$$

Diese Vorgehensweise besitzt ihre Gültigkeit ebenfalls zur Korrektur der Schwellenkontraste nach Kapitel 2.2.4.10 [vgl. VÖLKER 2006, S. 38].

2.2.4.7 EINFLUSS DES ALTERS

Der Einfluss des Beobachteralters wird folgend mittels des Altersfaktors AF berücksichtigt. Er wurde aus den Untersuchungen von BLACKWELL & BLACKWELL [1980] empirisch ermittelt. Hierfür gilt nach [ADRIAN 1989, S. 184 f.; ADRIAN 1993, S. 25; IESNA 2005, S. 24] für $t = 0,2$ s, $L_u = 100$ cd/m²:

$$AF = \begin{cases} \frac{(\text{Alter} - 19)^2}{2160} + 0,99 & 23 < \text{Alter} \leq 64 \\ \frac{(\text{Alter} - 56,6)^2}{116,3} + 1,43 & 64 < \text{Alter} < 75^{10} \\ \frac{(\text{Alter} - 58,45)^2}{125} + 1,7 & 64 < \text{Alter} < 75^{11} \end{cases} \quad (2.46)$$

Alternative Betrachtungen die sich insbesondere mit den Kontrastschwellen in Übergangsbereichen zum skotopischen Sehen beschäftigen, sind z. B. in [SCHEFRIN ET AL. 1999] zu finden. Da die Diskussion skotopischen Sehens nicht Fokus dieser Arbeit ist, soll an dieser Stelle nicht vertiefend darauf eingegangen werden.

2.2.4.8 EINFLUSS DER KOMPLEXITÄT DES GESICHTSFELDES

Die Komplexität des Gesichtsfeldes wirkt sich maßgeblich auf die Leuchtdichteschwelle aus und wird nach [CIE 1992, S. 15; KOKOSCHKA & GALL 2000, S. 12 f.] definiert als:

$$TSF = \frac{\left(1 + \frac{L_{\text{unt}}}{L_{\text{ad}}}\right)^2}{4 \frac{L_{\text{unt}}}{L_{\text{ad}}}} \quad (2.47)$$

TSF = transienter Schwellenerhöhungsfaktor, dimensionslos

L_{unt} = Untergrundleuchtdichte

L_{ad} = adaptionsbestimmende Umfeldleuchtdichte

¹⁰ Nach [ADRIAN 1989, S.1 184 f.] und ANSI IESNA RP-8-00 [IESNA 2005, S. 24].

¹¹ Nach [ADRIAN 1993, S. 25].

Sollen für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle, ausgenommen den Einfluss der Blendung, alle relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt werden, gilt die Erweiterung von Gleichung (2.17) auf [ADRIAN & GIBBONS 1993, S. 735; ADRIAN 1995, S. 820]:

$$\Delta L_{\text{th}} = k_p \cdot \left(\frac{\sqrt{\Phi}}{\alpha} + \sqrt{L} \right)^2 \cdot \frac{a(\alpha, L_u) + t}{t} \cdot F_{\text{CP}} \cdot AF \cdot TSF \quad (2.48)$$

k_p	=	Faktor zur Berücksichtigung der Wahrnehmungswahrscheinlichkeit
α	=	Winkelgröße des Sehobjektes in Winkelminuten
$a(\alpha, L_u)$	=	Blondel-Rey-Konstante nach Formel (2.40) bis (2.45)
t	=	Darbietungs- oder Beobachtungszeit in [s]
F_{CP}	=	Faktor zur Verrechnung des Negativkontrastes
AF	=	Faktor zur Berücksichtigung des Alters

2.2.4.9 QUANTIFIZIERUNG DER BLENDUNG

Da durch Blendquellen in den Augenmedien des Beobachters Streulicht hervorgerufen wird, erhöht sich die Leuchtdichteunterschiedsschwelle zum Erkennen eines Objektes durch die in Kapitel 2.2.3 eingeführte physiologische Blendung. Für ein vernachlässigbar kleines Sehobjekt wird deren Wirkung anhand der äquivalenten Schleierleuchtdichte $L_{s,\text{äq}}$ der Blendquelle und der Umfeldleuchtdichte L_{umf} auf die Adaptationsleuchtdichte L_{ad} berücksichtigt:

$$L_{\text{ad}} = L_{\text{umf}} + L_{s,\text{äq}} \quad (2.49)$$

mit der allgemeinen Definition der Schleierleuchtdichte nach IESNA und CIE Publikation 146:2002 [DILAURO ET AL. 2011; BOYCE 2009; CIE 2002] und den Leuchtdichtebewertungsfeldern nach Abbildung 2.9:

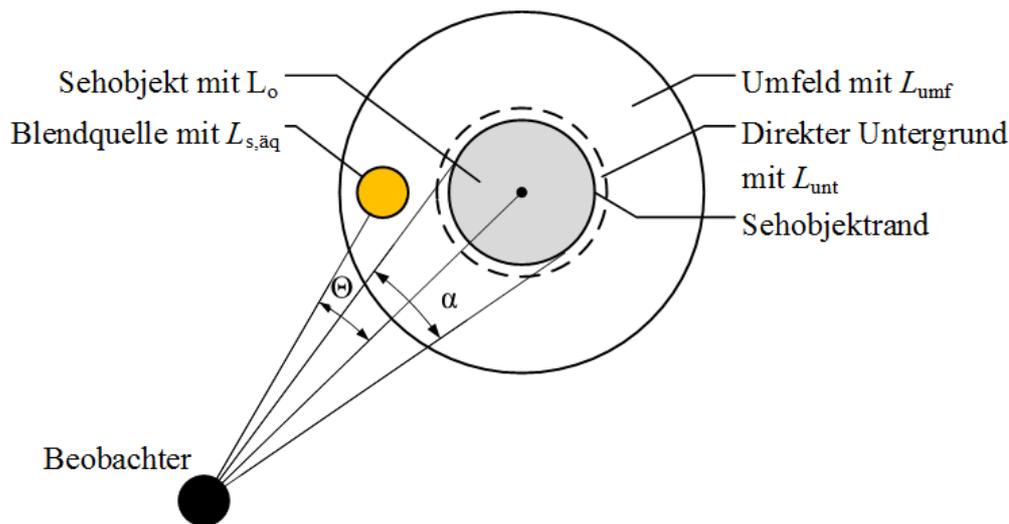


Abbildung 2.9: Zur Bewertung von Kontrast und Schleierleuchtdichte relevante Leuchtdichtebereiche [SCHADE 2008, S. 19].

$$L_{s,\text{äq}} = k_{\text{Bl}} \sum_{i=1}^n \left[\frac{E_{\text{Bl},i}}{\theta_i^m} + \frac{E_{\text{Bl},i}}{2 \left[\left(\frac{\text{Alter}}{62,5} \right)^4 \theta_i^2 \right]} \right] \quad [\text{cd/m}^2] \quad (2.50)$$

$E_{\text{Bl},i}$ = Blendbeleuchtungsstärke im Auge, die von der i -ten Blendquelle hervorgerufen wird in [lx]

k_{Bl} = Konstante zum Einfluss des Beobachteralters auf die physiologische Blendung, dimensionslos

Für Formel (2.50) gilt zum Beispiel, bezogen auf E_{Bl} eines 25-jährigen Beobachters, $k_{\text{Bl}} = 10$:

m = Modellabhängige Konstante mit $m \approx 2$ für $\theta \geq 2^\circ$ und $m \approx 2 - 0,7 \cdot \log(\theta)$ für $\theta < 2^\circ$ [IESNA 2005, S. 20].

Für Gleichung (2.51) ist m fest definiert mit $m = 3$. Weiter gilt:

θ_i = Blendwinkel zwischen Blickrichtung des Beobachters und der i -ten Blendquelle nach Abbildung 2.9

Alter = Alter des Beobachters in Jahren

Analog hierzu lässt sich $L_{s,\text{äq}}$ vereinfacht nach [IESNA 2005, S. 20] bestimmen:

$$L_{s,\text{äq}} = k \sum_{i=1}^n \frac{E_{\text{Bl},i}}{\theta_i^m} \quad \text{in cd/m}^2 \quad (2.51)$$

Sowohl Gleichung (2.50) als auch (2.51) basieren auf den Ergebnissen von HOLLADAY [1926] sowie LUCKIESH & HOLLADAY [1925]. Nach ADRIAN [1989, S. 189] und [CIE 2002, S. 7] gilt für $1,5^\circ < \theta_i < 30^\circ$ und ein Beobachteralter zwischen 25 und 80 Jahren:

$$k = (0,0752 \cdot \text{Alter} - 1,883)^2 + 9,2. \quad (2.52)$$

Beispielwerte für k enthält Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Beziehung zwischen Alter und Faktor k [vgl. BAER 2006, S. 73].

Alter	20	30	40	50	60
k	6,3	9,2	12,1	15,0	17,8

Wird $L_{s,\text{äq}}$ nicht direkt in die Leuchtdichteunterschiedsschwelle miteinbezogen, kann eine Bewertung der Blendung unabhängig von ΔL_{th} vorgenommen werden, indem die relative Schwellenerhöhung (engl. threshold increment) TI separat betrachtet wird. Diese Variante ist allgemein anerkannt als Gütekennzahl der Blendungsbewertung in der Straßenbeleuchtung und wird berechnet nach:

$$TI = \left(\frac{\Delta L_{\text{BL}}}{\Delta L_{\text{OB}}} - 1 \right) \cdot 100 \% \quad (2.53)$$

ΔL_{BL} = Schwellenwert der adaptionsbestimmenden Leuchtdichte

ΔL_{OB} = Summe aus ΔL_{BL} und $L_{s,\text{äq}}$

In DIN EN 13201-3 [DIN 2007F, S. 31] werden die Gleichungen (2.51) bis (2.53) vereinfacht zu:

$$TI = \left(\frac{65}{\bar{L}^{0,8}}\right) \cdot L_{s,\ddot{a}q} \% = \left(\frac{65}{\bar{L}^{0,8}}\right) \cdot 10 \sum_{i=1}^n \frac{E_{B1,i}}{\theta_1^2} \quad (2.54)$$

\bar{L} = mittlere Fahrbahnleuchtdichte.

2.2.4.10 OBJEKT KONTRAST UND SCHWELLEN KONTRAST

Als Alternative zum Leuchtdichteunterschied kann auch der Leuchtdichtekontrast bei einer Umgebungsleuchtdichte L_u zur Bestimmung der Erkennbarkeit herangezogen werden. Nach den Vorgaben aktueller Standards zur Straßenbeleuchtung, wie der Europäischen Norm DIN EN 13201 [DIN 2007E, S. 7] oder dem Amerikanischen Standard RP-8-00 [IESNA 2005], sollte L_u entsprechend der Beleuchtungsklasse Werte für Leuchtdichten von $0,3 \text{ cd/m}^2 \leq L_u \leq 2,0 \text{ cd/m}^2$ annehmen. Unter Berücksichtigung der geforderten Gleichmäßigkeiten und unter der Annahme, dass die maximale Leuchtdichte aus Gründen der Energieeffizienz und Gleichmäßigkeit der Verteilung nicht das 1,5-fache des mittleren Beleuchtungsniveaus überschreiten sollte, erweitert sich dieser Bereich zu $0,1 \text{ cd/m}^2 \leq L_{u,\max} \leq 3,0 \text{ cd/m}^2$. In diesem Leuchtdichtebereich lässt sich die Erkennbarkeit von Objekten mittels des Leuchtdichtekontrastes C verlässlich bestimmen, jedoch ist auf die Unstetigkeiten im Verlauf der Kurve des Schwellenkontrastes nach Adrian und Blackwell zu achten.

Da zur Bestimmung des Leuchtdichtekontrastes im Allgemeinen standardisierte Objekte verwendet werden, wird dieser auch als Objekt- oder Sehobjektkontrast bezeichnet. Die CIE Publikation 95: 1992 [CIE 1992] definiert den Kontrast zwischen Sehobjekt und Hintergrund als Leuchtdichteunterschied zwischen Objekt und unmittelbarem, das Objekt umgebenden Umfeld an:

$$C = \frac{\Delta L}{L_u} = \left| \frac{L_o - L_u}{L_u} \right| \quad (2.55)$$

C = Kontrast (engl. contrast)

L_o = Objektleuchtdichte (engl. target luminance)

L_u = Umfeldleuchtdichte (engl. background luminance)

Der so definierte Objektkontrast nach Weber kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wenn das Objekt dunkler als der Hintergrund ist. Dieser Zustand wird im Rahmen der Arbeit als Negativkontrast definiert. Ist dagegen das Objekt heller als der Hintergrund, nimmt der Kontrast Werte von 0 bis unendlich an und wird als Positivkontrast festgelegt [vgl. CIE 1992, S. 3 f.].

Damit ein Objekt wahrgenommen werden kann, muss der dargebotene Kontrast C den unter gleichen Sehbedingungen notwendigen Schwellenkontrast übersteigen. Der Schwellenkontrast, auch als Kontrastschwelle bezeichnet, ist allgemein definiert als

$$C_{th} = \frac{\Delta L_{th}}{L_u} \quad (2.56)$$

Oft wird im Zusammenhang mit der Sichtbarkeit von Objekten im Straßenraum von Tarnzonen gesprochen. Dieser Begriff dient als Umschreibung für Bereiche auf der Fahrbahn, in denen eine Tarnung des Objektes vorliegt. Von einer Tarnzone kann also gesprochen werden, wenn gilt [vgl. ENZMANN 1977, S. 12]:

$$L_u(1 - C_{th}) < L_o < L_u(1 + C_{th}), \quad (2.57)$$

beziehungsweise

$$L_u - \Delta L_{th} < L_o < L_u + \Delta L_{th}. \quad (2.58)$$

Der Kehrwert des Schwellenkontrastes wird als Unterschiedlichkeitsempfindlichkeit (engl. contrast sensitivity, *CS*) oder Unterschiedsschwelle bezeichnet.

Wie bei der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ist auch bei den Arbeiten zum Schwellenkontrast darauf zu achten, welche Wahrnehmungswahrscheinlichkeiten den Kurven der Schwellen zugrunde liegen. Gegebenenfalls müssen Umrechnungsfaktoren zwischen Detektion und Identifikation berücksichtigt werden. Im Falle der Berechnungen von Kokoschka ergibt sich ein Korrekturfaktor von 1,9 zwischen $p = 50\%$ und $p = 95\%$ Wahrnehmungswahrscheinlichkeit [KOKOSCHKA 1988; VÖLKER 2006, S. 29]. Als vertiefende Literatur zu Kontrast und Kontrastschwelle sind an dieser Stelle die CIE Publikationen 19/2.1:1981, 19/2.2:1981 und 95:1992 [CIE 1981A; CIE 1981B; CIE 1992] zu empfehlen sowie die Arbeiten von ADRIAN [1969], KOKOSCHKA [1988] und ENZMANN [1977].

Leicht zu Verwechslungen führt die alternative Kontrastdefinition nach KOKOSCHKA [vgl. 1988, S. 305 f.], welche umgeht, dass bei der Beschreibung des Schwellenkontrastes für verschiedene Adaptationsleuchtdichtebereiche bzw. Leuchtdichteniveaus unterschiedliche Formeln angewendet werden müssen. Bei seiner Definition von C ist nicht das Objektfeld im Nenner, sondern abhängig von Positiv- oder Negativkontrast die kleinere der beiden Leuchtdichten L_{dunkel} . Der Leuchtdichteunterschied zwischen Objekt und Untergrund bestimmt sich immer durch die Differenz aus höherer Leuchtdichte L_{hell} und niedriger Leuchtdichte L_{dunkel} :

$$C = \frac{L_{hell} - L_{dunkel}}{L_{dunkel}} \quad (2.59)$$

Dies hat den Sinn, dass beide Kontrastarten den gleichen Kontrastwertebereich von 0 bis ∞ haben. Entsprechend bestimmt Kokoschka den theoretischen Schwellenkontrast nach der Form

$$C_{s,Kok} = S \cdot C_0 \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (2.60)$$

mit der Leuchtdichtefunktion f_1 und der Winkelfunktion f_2 ,

$$f_1 = 1 + \left(\frac{L_{ad}}{c_1}\right)^{c_2}; \quad f_2 = 1 + \left(\frac{\alpha_0}{\alpha}\right)^2, \quad (2.61)$$

sowie

$$\alpha_0 = c_3 + c_4 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{L_{ad}}{c_5}\right)^{c_6}}\right). \quad (2.62)$$

Der Faktor S berücksichtigt die Möglichkeit unterschiedlich schwieriger Beobachtungsbedingungen. $S = 1$ gilt für günstige Bedingungen. Bei schwierigen Bedingungen ist S entsprechend höher anzusetzen. Für $S = 1$ gilt weiter: $c_0 = 0.00275$, $c_1 = 0.158$, $c_2 = -0.484$, $c_3 = 7.5$, $c_4 = 133$, $c_5 = 0.00075$, $c_6 = -0.383$. Formel (2.60) gilt unter der adaptionsbestimmenden Umfeldleuchtdichte L_{ad} für eine Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 50 %. Für eine einfache Detektionsaufgabe nahezu 100 %iger Detektionswahrscheinlichkeit liegt der entsprechende Schwellenkontrast um etwa das Dreifache höher.

Nach Abbildung 2.5 differenziert KOKOSCHKA [1988] die Umgebung des Objektes in einen, das Sehobjekt der Leuchtdichte L_o unmittelbar umschließenden Untergrund der Leuchtdichte L_u und einen weitläufigen Hintergrund der L_{ad} . Weicht die L_u deutlich von der adaptionsbestimmenden Hintergrundleuchtdichte ab, ist die differenzierte Methode eine sinnvolle Alternative zur Unterscheidung von Objekt und Umfeld bei der Bestimmung der Kontrastschwelle.

Die Implementierung der äquivalenten Schleierleuchtdichte nach den Gleichungen (2.50) und (2.51) aus dem Unterpunkt 2.2.4.9 erfolgt unter Berücksichtigung von Gleichung (2.49) nach der Definition ADRIANS [1989, S. 189] für den durch die äquivalente Schleierleuchtdichte reduzierter Kontrast C_{red} :

$$C_{red} = \frac{(L_o + L_{s,\ddot{a}q}) - (L_u + L_{s,\ddot{a}q})}{(L_u + L_{s,\ddot{a}q})} = \frac{L_o - L_u}{L_u + L_{s,\ddot{a}q}} = \frac{\Delta L}{L_{ad}} \quad (2.63)$$

2.2.4.11 VISIBILITY LEVEL

Neben den bekannten und bereits vorgestellten Arbeiten von Blackwell, Adrian, Berek und Dunbar stellten auch LOSSAGK [1955] und GROSSKURTH [1957] Untersuchungen zum Kontrast und Schwellenkontrast an. Sie bezeichneten das Verhältnis C/C_s als „Überschwelligkeit“ oder „Überschwelligkeitsfaktor“. Im englischsprachigen Raum etablierte sich für die Überschwelligkeit der Begriff „Visibility Level“ (VL). Aufgrund der weiten Verbreitung folgt die Nomenklatur dieser Arbeit dieser Vereinbarung und definiert das Verhältnis von Kontrast C zum Schwellenkontrast C_{th} bei fovealer Beobachtung wie folgt [ADRIAN & GIBBONS 1993, S. 734]:

$$VL = \frac{C}{C_{th}} \quad (2.64)$$

Das Visibility Level kann ebenso über das Verhältnis des in der Beobachtungssituation vorliegenden Leuchtdichteunterschiedes ΔL zwischen Objekt und Umfeld zum Schwellenleuchtdichteunterschied ΔL_{th} aus Kapitel 2.2.4.1 gebildet werden.

$$VL = \frac{\Delta L}{\Delta L_{th}} = \frac{L_o - L_u}{\Delta L_{th}} \quad (2.65)$$

Die Berücksichtigung aller bisher vorgestellten Einflussfaktoren auf die Leuchtdichteunterschiedsschwelle erfolgt durch Einsetzen von Gleichung (2.48) auf Seite 24 wie folgt:

$$|VL| = \left| \frac{L_o - L_u}{k \cdot \left(\frac{\sqrt{\Phi}}{\alpha} + \sqrt{L} \right)^2 \cdot \frac{a(\alpha, L_u) + t}{t} \cdot F_{CP} \cdot AF \cdot TSF} \right| \quad (2.66)$$

k	=	Faktor zur Berücksichtigung der Wahrnehmungswahrscheinlichkeit
α	=	Winkelgröße des Sehobjektes in Winkelminuten
$a(\alpha, L_u)$	=	Blondel-Rey-Konstante nach Formel (2.40) bis (2.45)
t	=	Darbietungs- oder Beobachtungszeit in [s]
F_{CP}	=	Faktor zur Verrechnung des Negativkontrastes
AF	=	Faktor zur Berücksichtigung des Alters

Erst das VL setzt also die Sichtbedingungen einer gegebenen Situation in Beziehung mit der Schwelle, welche zum Erkennen eines definierten Objektes in dieser Situation notwendig ist. Es eignet sich daher besonders zur Beschreibung der Erkennbarkeit von Objekten.

2.2.4.12 SMALL TARGET VISIBILITY-KONZEPT

Das im RP-8-00 Standard implementierte Small Target Visibility (STV)-Konzept ist im Wesentlichen ein gewichteter Mittelwert aller N_0 $|VL_i|$ -Werte eines VL -Verlaufes entlang des für den Verlauf definierten Bewertungsfeldes unter Berücksichtigung des Kontrastpolaritätsfaktors F_{CP} nach Gleichung (2.36) auf Seite 21 [vgl. IESNA 2005, S. 24]. Das STV Niveau ist definiert als Small Target Visibility Level $STVL$:

$$STVL = -10 \log \left(\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} 10^{(-0,1 \cdot |VL_i|)} \right) \quad (2.67)$$

N_0	=	Anzahl aller einzelnen VL -Werte
VL_i	=	VL -Einzelwerte im Bereich des Bewertungsfeldes

2.2.4.13 REVEALING POWER UND KRITISCHER REFLEXIONSGRAD

Der Ansatz der Erkennbarkeitsleistung von Objekten auf der Fahrbahn wurde bereits 1938 von WALDRAM [1938] als Maß der Qualität von Straßenbeleuchtung unter dem Begriff „Revealing Power“ (RP) eingeführt und war somit einer der ersten umfassenden Ansätze zur Bestimmung der Erkennbarkeit. Im Gegensatz zum „Visibility Level“-Ansatz nach Kapitel 2.2.4.11 bezieht er sich nicht ausschließlich auf ein berücksichtigtes Referenzsehobjekt eines bestimmten Reflexionsgrades, welches die Gültigkeit der Erkennbarkeit auf diese begrenzt. RP berücksichtigt vielmehr die kumulative Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von Reflexionsgraden der Bekleidung von Fußgängern nach den Untersuchungen von SMITH [1938], welche parallel zu Waldrams Untersuchungen veröffentlicht wurden. Auf diese Weise wird eine Aussage über komplette Reflexionsgradbereiche anstelle nur eines Referenz-Reflexionsgrades gegeben. Abbildung 2.10 zeigt die kumulierte Wahrscheinlichkeit der Reflexionsgrade nach SMITH [1938].

Nach der Definition von Waldram beschreibt die auch als Erkennbarkeitsleistung bezeichnete RP die kumulierte Wahrscheinlichkeit des Reflexionsgrades nach Abbildung 2.10 unter definierten Beobachtungsbedingungen mit der ein Objekt gerade erkannt wird [vgl. NARISADA ET AL. 2003, S. D4-52; vgl. WALDRAM 1938, S. 173 f.]. Den Reflexionsgrad eines gerade

sichtbaren Objektes fassen NARISADA ET AL. [2003, S. D4-52] als kritischen Reflexionsgrad zum Erkennen des Objektes mit dem kritischen Reflexionsgrad ρ_k nach den Definitionen von Waldram zusammen. Dieses Objekt wird als kritisches (Seh-)Objekt bezeichnet.

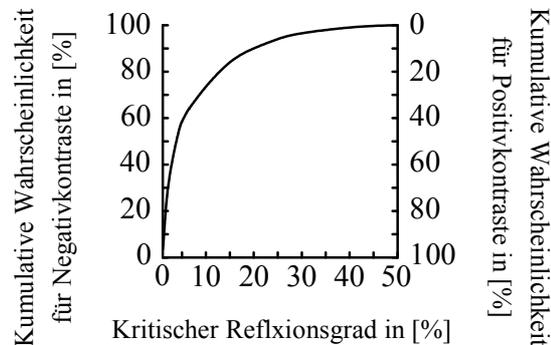


Abbildung 2.10: Zusammenhang zwischen kritischem Sehobjektreflexionsgrad und der kumulierten Wahrscheinlichkeit deren Erkennens für Negativ- und Positivkontrast anhand des VL nach NARISADA ET AL. [2003, S. D4-52].

Nach NARISADA ET AL. [2003, S. D4-52] erfolgt die Verknüpfung von ρ_k über die Definition des gerade gesehenen Objektes mit $|VL| \geq 1$. Die Berücksichtigung des Einflusses, dass ein Objekt mit negativem Objektkontrast besser gesehen wird, als ein Objekt mit positivem erfolgt entsprechend Abbildung 2.10 mittels kumulierter Wahrscheinlichkeit von ρ_k . Es gilt weiter, dass wenn ein kritisches Sehobjekt mit $\rho_k = 20\%$ und einem $VL = -1$ (negativer Kontrast, gerade sichtbar) erkannt wird, an derselben Position auch alle Objekte mit einem Reflexionsgrad $\rho_k < 20\%$ erkannt werden. Nach Abbildung 2.10 beträgt die kumulative Wahrscheinlichkeit für $\rho_k = 20\%$ $p_{rev,neg} = 90\%$, was dem entsprechenden Revealing Power Wert p_{rev} ohne eine Berücksichtigung der Blendung entspricht. Weist dasselbe Sehobjekt jedoch einen Positivkontrast auf und wird mit $VL = 1$ gerade erkannt, so beträgt $p_{rev,pos}$ lediglich 10% .

Die Gesamterkennbarkeitsleistung (engl. overall revealing power) beschreibt den Anteil der Fläche eines definierten Bewertungsfeldes für den eine bestimmte Revealing Power gegeben ist. Auf diese Weise kann von einem Bewertungsfeld ein Iso-RP-Diagramm mit Linien gleichen RPs erstellt werden. Die Bewertung der Erkennbarkeit mittels RP ist also nicht der Erkennbarkeit nach VL gleichzusetzen, da dies ausschließlich Auskunft über einen speziellen der Berechnung zugrunde liegenden Referenz-Reflexionsgrad gibt, meist $\rho_{ref} = 20\%$ [IESNA 2005] oder [NARISADA ET AL. 2003; HENTSCHEL 1971; IESNA 2005] $\rho_{ref} = 50\%$. Wie der Leuchtdichteansatz und das VL ist die RP ein statischer Beobachtungsansatz und unter dynamischen Beobachtungen kaum erforscht [vgl. NARISADA ET AL. 2003, S. D4-50 f.].

Die Definition des kritischen Reflexionsgrades nach Waldram und Narisada ist nicht zu verwechseln mit der Definition des kritischen Reflexionsgrades nach REEB [1954], der anzeigt, „in welchem Beobachterabstand ein Objekt dieses Reflexionsgrades gegen den Hintergrund verschwindet“ [REEB 1954, S. 287]. Er unterscheidet dabei die Beobachtungsbedingungen „stationär“, „quasistationär“ und „dynamisch“ [REEB & SCHLEISS 1956]. Siehe auch Kapitel 2.1.3.

Einen konkurrierenden Ansatz zum Revealing Power Ansatz nach WALDRAM [1938] führte Hentschel im Rahmen seiner Untersuchungen zur Erkennbarkeit [HENTSCHEL 1967; HENTSCHEL 1969; HENTSCHEL 1971] mit der Tarnwahrscheinlichkeit ein. Der Ansatz von Hentschel basiert jedoch auf der Gewichtung der Reflexionsgrade nach den Ergebnissen von GOLDMANN [1956A] und ist somit nur ähnlich der inversen Funktion zum *RP*-Ansatz. Eine interessante ergänzende Diskussion der Thematik bieten WALDRAM & HENTSCHEL [1972].

2.2.4.14 BEOBACHTUNGSBEDINGUNGEN IN DER PRAKTISCHEN ANWENDUNG

Nach ENZMANN [1977, S. 13], LOSSAGK [1955] und GROßKURTH [1957] sind für die praktische Leuchtdichteunterschiedsschwelle unter realen Bedingungen weit höhere Werte anzusetzen als die unter günstigen Laborbedingungen ermittelten Kurven von BLACKWELL [1946]. Insbesondere Korrekturfaktoren für die Unerwartetheit des Auftauchens eines Hindernisses (Sehobjektes) und zur Berücksichtigung der Blickzeitverkürzung (siehe Abschnitt 2.2.4.6) von unendlich ($t > 2$ s) auf praktische Werte müssen unter realen Beobachtungsbedingungen in die Ermittlung der Unterschiedsschellen integriert werden. Die Kombination aus Blickzeitverkürzung und Unerwartetheit bei entsprechend schlechteren Sehbedingungen fasst Kokoschka mit einem auf ähnliche Weise begründeten Praxisfaktor S (entspricht k_p aus Abschnitt 2.2.4.4) für ungünstige Sehbedingungen ($S = 1$ bei günstigen Sichtbedingungen bis hin zu $S \approx 10$ für ungünstige Bedingungen) [KOKOSCHKA 1988, S. 307] wie folgt zusammen:

$$VL_{\text{Praxis}} = \frac{\Delta L}{S \cdot \Delta L_{\text{th}}} = \frac{C}{S \cdot C_{\text{th}}} \quad (2.68)$$

2.2.5 AKTUELLE ANFORDERUNGEN AN DIE ERKENNBARKEIT

Die Berechnungsmethoden zur Quantifizierung der Erkennbarkeit wurden in Abschnitt 2.2.4 ausführlich beschrieben. Die Anforderungen für gute Erkennbarkeit, denen eine Vielzahl von empirischen wahrnehmungsphysiologischen Untersuchungen zugrunde liegen, [AKASHI ET AL. 2007; BACELAR ET AL. 1999A; BLACKWELL & BLACKWELL 1971] werden in diesem Abschnitt vorgestellt und sind u. a. in [CIE 1981A; CIE 1981B; CIE 1992; CIE 2010A; IESNA 2005] festgehalten.

Die meisten Untersuchungen zum Visibility Level empfehlen mindestens einen $|VL| > 1$, um unter günstigen Sichtbedingungen ein Objekt überhaupt erkennen zu können [CIE 1981A; CIE 1981B; CIE 2010A; ADRIAN 1969; ADRIAN 1989; KECK & VICKSBURG 1993]. Nach ENZMANN [1977, S. 13], LOSSAGK [1955] und GROßKURTH [1957] sowie DIJON ET AL. [1997; 1998] wird unter praktischen Bedingungen, wie sie im Straßenverkehr vorkommen, ein wesentlich höherer Wert benötigt. Ungünstige Bedingungen, wie die Unerwartetheit des Auftauchens eines Hindernisses (Sehobjektes), (Erhöhung von ΔL_{th} um Faktor 4) oder die Verkürzung der Blickzeit nach Kapitel 2.2.4.1 von unendlich ($t > 2$ s) auf praktische Werte (Erhöhung von ΔL_{th} um Faktor 2,6) [vgl. ENZMANN 1977, S. 13] führen in Kombination zur Empfehlung eines Praxisfaktors S von circa 10 [KOKOSCHKA 1988, S. 307].

Um ausreichende Sicherheit bei realen Beobachtungsbedingungen unter ortsfester Straßenbeleuchtung zu garantieren, empfehlen DIJON ET AL. [1997; 1998] sowie MÉNARD & CARIOU [1994] nach ihren empirischen Untersuchungen $|VL|$ -Werte von mindestens 7 [vgl. DIJON & JUSTIN 1998, S. 138]. Sie verglichen reale und simulierte Testszenarien zur Validierung des VL -Modells mit 20 x 20 cm großen flachen Sehobjekten und sphärischen Objekten mit 20 cm Durchmesser von $\rho_o = 24\%$, $\rho_o = 31\%$ und $\rho_o = 38\%$ [vgl. DIJON & JUSTIN 1998, S. 139]. Parallel führten sie Simulationen mit der Raytracing Software Radiance durch und verglichen die Ergebnisse der Visibility-Berechnungen nach VL mit den Ergebnissen aus einer eigenen Probandenuntersuchung. Die Skalierung der Probandenaussagen wurde nach Tabelle 2.3 auf Basis der Ergebnisse des Probandenversuchs in Beziehung zu den Beträgen des VL gesetzt.

Tabelle 2.3: Zuordnung von VL -Bereichen und Beurteilung innerhalb des Experiments VON DIJON UND JUSTIN [1998].

Erkennbarkeit	Beurteilung
$0 < VL < 2$	\cong 0 target invisible
$2 < VL < 6$	\cong 1 target hardly visible, more of a guess than anything else
$6 < VL < 10$	\cong 2 target slightly visible, requires attention
$10 < VL < 14$	\cong 3 target slightly visible, draws attention
$14 < VL < \dots$	\cong 4 target perfectly visible

Aus ihren Beobachtungen leiten DIJON & JUSTIN [1998, S. 140] ab, dass ein VL von 8 einem gerade („slightly“) erkennbaren Objekt entspricht und empfehlen daraufhin diesen Wert als Richtwert für ein minimales Visibility Level für sicheren Straßenverkehr. Sie betonen jedoch, dass daraus keine simple Hypothese wie „higher than X = good, lower than Y = bad“ abgeleitet werden kann. Vielmehr sei es notwendig, alle Einflussparameter der Erkennbarkeit als Gesamtes zu betrachten und sich über die Grenzen des Konzeptes im Klaren zu sein. DIJON & JUSTIN [1998] kommen mit ihren Untersuchungen daher zu dem Ergebnis, dass der Bewertungsansatz des Visibility Level die Methode der Leuchtdichtebewertung vervollständigt. Dies wirft jedoch die Frage auf, wie diese Methoden hinsichtlich der Planung und Bewertung einer Beleuchtungssituation interagieren.

Umfangreiche Erkennbarkeitsuntersuchungen der 1990er und der frühen 2000er Jahre fordern für den in den vorliegenden Untersuchungen angewandten Leuchtdichtebereich um 1 cd/m^2 einem Mindest- $|VL|$ von 7 [MÉNARD & CARIOU 1992; BACELAR ET AL. 1999A; BACELAR ET AL. 1999B; LECOCQ 1997, S. 35 f.; PAULMIER ET AL. 2001]. Auch Untersuchungen von ADRIAN [1995, S. 826] ($STVL_{\min} \geq 6 - 9$), Dunbar und De Boer ($|VL|_{\min} \geq 7 - 8,5$), Janoff ($|VL|_{\min} \geq 9 - 11$) nach [ADRIAN 1993B, S. 51 f.] sowie DIJON & JUSTIN [1998, S. 138, 140] ($|VL|_{\min} \geq 8$) (siehe auch Tabelle 2.3) empfehlen ähnliche Mindestwerte. Andere Arbeiten zur Erkennbarkeit [BACELAR ET AL. 1999B; PAULMIER ET AL. 2001; BRUSQUE ET AL. 1999] fordern bei $\bar{L} \approx 1 \text{ cd/m}^2$ und höher, abhängig von der Komplexität des Hintergrundes $|VL|_{\min} \geq 7 - 8$ (homogener Hintergrund), über $|VL|_{\min} \geq 10$ (niedrige Komplexität) und $|VL|_{\min} \geq 25$ (hohe Komplexität) bis hin zu $|VL|_{\min} \geq 20 - 35$ (hohe Komplexität, Detektionsrate 100 %).

Da Diskussionen zum VL oftmals $|VL|_{\min}$ und \bar{VL} nicht differenziert betrachten, untersuchten GÜLER ET AL. [2003, S. 207-213] Straßen verschiedener Beleuchtungsniveaus mit einem guten $\bar{VL} \geq 7$ hinsichtlich VL_{\min} . Sie fanden heraus, dass die Einzel- VL oft Beträge < 1 in weiten Bereichen der Fahrbahn aufwiesen und empfehlen bei der Kommunikation von \bar{VL} oder $STVL$

die Ergänzung um die Minimalwerte. Dies bestätigt die unumstrittene Forderung danach, dass einzelne VL -Beträge < 1 in jedem Fall zu vermeiden sind (vgl. Abschnitte 2.2.4 und 2.3.1).

2.3 OPTIMIERUNG VON LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKÖRPERN

Nach dem aktuellen Stand der Erkenntnisse wurden Optimierungen von Lichtstärkeverteilungen entweder zur Verbesserung der Sicherheit oder zur Senkung des Energiebedarfs der Beleuchtungsanlage vorgenommen. Beide Forschungsfelder sollen daher nachfolgend bis hin zum aktuellen Stand der Technik erläutert werden.

2.3.1 OPTIMIERUNG AUF SICHERHEIT

Mit der Einführung der Quantifizierung von Qualität und Sicherheit einer Straßenbeleuchtung nach dem Leuchtdichteverfahren in den 1930er Jahren wurde es komplizierter, geeignete Lichtstärkeverteilungen für eine hochwertige Ausleuchtung des Verkehrsraumes zu bestimmen. Es wurden meist intuitive Suchverfahren zur Ermittlung geeigneter Lichtstärkeverteilungskörper angewandt [ROCH & SMIA TEK 1969; HOCHSTÄDT 1970].

Erste umfangreiche Untersuchungen zu einer sicherheitsorientierten Optimierung der Straßenbeleuchtung anhand der Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte auf der Fahrbahn führten u. a. EBERBACH [1973] und ENZMANN [1977] in den 1970er Jahren durch. Während sich Eberbach zum Ziel seiner Arbeit die Optimierung von LVK auf eine hohe Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte bei definiertem Leuchtdichteniveau setzte [EBERBACH 1973, S. 2], fügte Enzmann diesem Prinzip die gleichzeitige Bewertung der Erkennbarkeit anhand kleiner Sehtäfelchen hinzu [ENZMANN 1977, S. 64].

Beide nutzen approximative Berechnungsverfahren mit linearen Gleichungssystemen, um den LVK auf eine hohe Gleichmäßigkeit der Fahrbahnleuchtdichte hin zu optimieren. Eine Optimierung direkt auf die Erkennbarkeit von Sehobjekten findet nicht statt. EBERBACH [1973] verwendet lineare Gleichungssysteme, die durch Anwendung eines Gauss-Algorithmus gelöst werden. Die so für jeden Berechnungspunkt auf der Fahrbahn aufgestellten linearen Gleichungssysteme werden exakt oder im Falle der Überbestimmung approximativ gelöst. Der Einsatz des Verfahrens ist auf die Ausleuchtung des Bewertungsfeldes mit zwei aufeinander folgenden Leuchten beschränkt [EBERBACH 1973]. ENZMANN [1977] erweiterte das Verfahren um den Einfluss der nicht unmittelbar das Bewertungsfeld einrahmenden Lichtpunkte. Die mit seinem Verfahren erreichten hohen Leuchtdichtegleichmäßigkeiten gehen jedoch zu Lasten der Blendung aufgrund der flachen Grenzabstrahlwinkel. Der betrachtete Leuchtenabstand wird entsprechend dem Verhältnis von Masthöhe zu Mastabstand im Bereich von 1 zu 2 [ENZMANN 1977, S. 39] beziehungsweise 1 zu 3 [EBERBACH 1973, S. 37] gewählt, um den Einfluss der Blendung durch den generierten LVK niedrig zu halten und hohe Längsgleichmäßigkeiten der Fahrbahnleuchtdichte ermöglichen zu können. Bereits in diesen ersten Arbeiten wurde untersucht, ob die Erkennbarkeit von Standard-Sehobjekten als ergänzendes Bewertungskriterium für die Qualität der Beleuchtung heranzuziehen ist. ENZMANN [1977] ermittelte durch gezielte Manipulation den Einfluss der Blendung auf die Erkennbarkeit und stellte fest, dass eine hohe Gleichmäßigkeit nur bei erhöhter äquivalenter Schleierleuchtdichte am Auge zu erzielen sei. Er empfiehlt daher eine Gleichmäßigkeit von 0,8 für gute Erkennbarkeiten nicht zu

überschreiten, da es bei seinen Untersuchungen für Gleichmäßigkeiten $> 0,8$ zu starker Blendung kommt [vgl. ENZMANN 1977, S. 97].

Zu Beginn der 1980er Jahre führte WASSILEV [1982] diesen Ansatz 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 [1969]. Er führt jedoch keine Optimierung im engeren Sinne durch, sondern vergleicht an einer Testanlage für verschiedene Mastabstände und verschiedene Fahrbahndeckschichtreflexionstypen die *VL*-Verteilungen für LVK-Kategorien, wie „Tiefstrahler“, „Breitstrahler“, „Gegenstrahl-“, und „Mitstrahlprinzip“. Andere Untersuchungen von u. a. VASILEV ET AL. [2010A; 2010B] orientieren sich weiter an dem im ANSI IESNA RP-8-00 definierten *STVL*.

2.3.2 OPTIMIERUNG AUF ENERGIEEINSPARUNG

In den 1990er Jahren führten LESZCZYNSKA & KURZAWA [1990] sowie VELINOV [1996] erste lineare Optimierungen bezüglich der Minimierung des Gesamtlichtstroms einer Leuchte anhand der Minimierung Summe der Einzellichtstärken nach

$$\sum_{i=1}^n I_i \Rightarrow \min \quad (2.69)$$

als Zielfunktion durch. Als Randbedingungen wurden Mindestvorgaben für das Leuchtdichtenniveau, die Gesamt- und Längsgleichmäßigkeit festgelegt. Dabei wurde auch der Objektkontrast eines Sehobjektes auf der Fahrbahn mit einem Reflexionsgrad von $\rho_0 = 20\%$ berücksichtigt.

Einen ähnlichen Ansatz, welcher die Anforderungen der Norm für Straßenbeleuchtung DIN 5044-82 zur Grundlage hat, entwickelten VASSILEV & VELINOV [2004], um den Lichtstrom einer Leuchte bei gegebener Beleuchtungsinstallation mittels linearer Optimierung zu minimieren. Ein wesentliches Ergebnis ihrer Untersuchungen ist der Beleg für den negativen Einfluss der Gesamtgleichmäßigkeit auf den aufzuwendenden Lichtstrom zur Erfüllung der Norm [VASSILEV ET AL. 2005]. Aufgrund des nicht-linearen Zusammenhangs der Funktionen von Leuchtdichte, Leuchtdichtegleichmäßigkeit, Blendung und dem Lichtstrom des LVK entwickelten VASILEV & VELINOV [2007] eine Methode der nicht-linearen Optimierung von LVK auf den minimalen Lichtstrom. Auch PACHAMANOV & PACHAMANOVA [2008] bevorzugten den Weg einer nicht-linearen Optimierung, da die Berechnungen mittels linearer Optimierung zwar präzise sind, allerdings leicht zu einer großen Anzahl von Berechnungsvariablen und einer genauen, jedoch rauen Form der LVK führen können. Dabei wird die Zielfunktion, in diesem Falle die Minimierung des Lichtstromes, mittels eines Polynoms folgender Form vorgeschlagen:

$$I(\gamma, C) = \sum_{r=0}^3 \sum_{s=0}^5 a_{r,s} \cdot C^r \cdot \gamma^s \quad (2.70)$$

- a = gesuchter Koeffizient
- r = Laufvariable der Potenz des C-Winkels
- s = Laufvariable der Potenz des γ -Winkels

Diese Polynomschreibweise führt nach PACHAMANOV & PACHAMANOVA [2008] zu einer Reduktion der Variablen und einer glatteren LVK. Die so errechnete Lösung ist jedoch nicht unbedingt das gesuchte globale Extremum der Optimierung. Als beschränkende Randbedingungen werden die Gütevorgaben für Straßen- und Tunnelbeleuchtung herangezogen [vgl. PACHAMANOV & PACHAMANOVA 2008, S. 50-55]. Der nicht-lineare Ansatz wurde daraufhin auch von GEORGIEV & VASILEV [2008] und STEFANOV & VASSILEV [2009] aufgegriffen, mit Fokus auf die Vergleichbarkeit zum Standard ANSI IESNA RP-8-00 und der darin angewandten *STVL*-Methode zur Bewertung der Erkennbarkeit standardisierter Sehobjekte.

2.4 ABLEITUNG DER RELEVANZ DER ARBEIT AUS DEN AKTUELLEN ERKENNTNISSEN

Die zuvor beschriebenen Ansätze zur Optimierung der Lichtstärkeverteilungskörper befassen sich entweder mit der Optimierung der Lichtverteilung auf angemessene Sichtbarkeit bei hohen Mastabständen oder mit der Energieeffizienzsteigerung der Beleuchtungsanlage durch die Minimierung des Lichtstroms. Sowohl die Verfahren zur Verbesserung der Leuchtdichtehomogenität oder Erkennbarkeit als auch die Optimierungsansätze zur Minimierung des Lichtstroms erzielen gute Ergebnisse hinsichtlich ihres spezifizierten Optimierungsziels. Sie können sich somit als Ansatz für eine Optimierung konkurrierender Optimierungsziele eignen.

Einen kombinierten Ansatz, welcher gleichzeitig den Lichtstrom einer ortsfesten Straßenbeleuchtungsinstallation minimal halten und die Sicherheit anhand der Erkennbarkeit maximiert, um so eine Lösung des Zielkonfliktes zwischen minimalem Energiebedarf und maximaler Sicherheit anzustreben, gibt es bisher in dieser Form zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit nicht.

Ebenso ungeklärt ist der Einfluss bestehender Planungs- und Bewertungsansätze für qualitativ hochwertige Straßenbeleuchtung auf das Ergebnis der Optimierung von LVK. Vergleiche gleichmäßigkeitsorientierter Optimierungsansätze mit erkennbarkeitsbezogenen Optimierungen hinsichtlich Energiebedarf und Sicherheit sind derzeit nicht bekannt.

Ein Ansatz, welcher die den Arbeiten aus Kapitel 2.3 zugrunde liegenden Verfahren zwar aufgreift, jedoch vielmehr die Interaktion der einzelnen geometrischen, lichttechnischen und wahrnehmungsphysiologischen Einflussparameter untereinander untersucht, bietet die Möglichkeit, neue Erkenntnisse zu Planung und Bewertung von und mit örtlich optimierten Lichtstärkeverteilungskörpern zu erlangen und entsprechende Empfehlungen zu geben.

3

UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Innerhalb dieses Kapitels werden aus der Zielstellung der Arbeit zentrale Forschungsfragen abgeleitet, welche schließlich anhand von untersuchungsfeldspezifischen Arbeitshypothesen operationalisiert werden. Die Randbedingungen und Festlegungen, welche die Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands voraussetzt, werden ebenfalls definiert. Intention dieser Parametervariation ist die Gewinnung fundierter Aussagen hinsichtlich der Interaktion der berücksichtigten Beleuchtungssituationen und Optimierungsmethoden.

3.1 ABLEITUNG DER FORSCHUNGSFRAGEN AUS DER ZIELSTELLUNG

Aus der angestrebten Lösung zum Zielkonflikt zwischen bestmöglichen Sichtverhältnissen ortsfester Straßenbeleuchtung und gleichzeitig geringem Energiebedarf durch die Optimierung von Lichtstärkeverteilungskörpern (LVK) nach Kapitel 1.1 resultieren vier wesentliche Untersuchungsfelder:

Untersuchungsfeld 1 (U1) – Auswahl, Umsetzung und Untersuchung unterschiedlicher multikriteriell optimierter Lichtverteilungen zur Bereitstellung guter Erkennbarkeit

Als grundlegender Ansatz gilt bereits bei der Auswahl möglicher LVK-Optimierungsziele die Forderung, den beiden durch den Zielkonflikt bedingten Leitgedanken nachzukommen:

- 1) Primärziel: Ermöglichte mit hohen Erkennbarkeiten gute Sichtverhältnisse für eine hohe Sicherheit der Verkehrsteilnehmer.
- 2) Sekundärziel: Halte den Energiebedarf des Systems niedrig.

Das Sekundärziel lässt sich anhand des Gesamtlichtstroms der betrachteten Lichtquelle bewerten. Wenn dieser minimiert wird, so wird unter sonst gleichen Bedingungen der Energiebedarf des einzelnen lichterzeugenden Systems minimiert. Diese Herangehensweise ist daher auch Grundlage der bisherigen Arbeiten zur Einsparung von Energie durch die Anpassung von LVK nach Abschnitt 2.3.2.

Um hierfür die Rahmenbedingungen entsprechend dem Primärziel vorzugeben, gibt es nach Unterkapitel 2.2 mehrere Möglichkeiten für eine Quantifizierung der Qualität der Sichtverhältnisse. Die meisten der in Kapitel 2.3 dargelegten bisherigen Untersuchungen zur LVK-Anpassung konzentrieren sich entweder auf eine Gleichmäßigkeit der Fahrbahnausleuchtung oder die Erkennbarkeit von Sehobjekten als zentrales Kriterium. Vergleichende Untersuchungen

möglicher Optimierungsmethoden fanden in den bisherigen Forschungen nicht statt. Speziell ein Vergleich der direkten Erkennbarkeitsoptimierung mit der Herangehensweise, die Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte oder Beleuchtungsstärke zu maximieren, um durch eine uniforme Ausleuchtung bei gegebenem Beleuchtungsniveau der Fahrbahn ein Höchstmaß an Sicherheit bereitzustellen, wurde bisher nicht umfassend betrachtet. So stellen sich als zentrale Forschungsfragen (F) des ersten Untersuchungsfeldes:

- (F1.a): *„Können die Ziele der ausgewählten Optimierungen sinnvoll erfüllt werden?“*
- (F1.b): *„Bieten die ausgewählten Optimierungsmethoden, sofern ihre Ziele erfüllt sind, jeweils die Möglichkeit, schlechte Erkennbarkeiten hinreichend zu vermeiden?“*
- (F1.c): *„Welches Optimierungskriterium bietet in der ortsfesten Straßenbeleuchtung die besten Erkennbarkeiten, wenn es entsprechend F1.a sinnvoll erfüllt wird?“*
- (F1.d): *„Bewirkt die direkte Optimierung der Erkennbarkeit im Vergleich herausragende Ergebnisse hinsichtlich der Erkennbarkeit oder gewährleisten die Optimierungen auf eine gleichmäßige Fahrbahnausleuchtung gleichwertige Sichtbedingungen bei angemessenem Beleuchtungsniveau?“*

Untersuchungsfeld 2 (U2) – Betrachtung des Einflusses der Beleuchtungsinstallation und der Beobachtungsform auf die Erkennbarkeiten aus U1

Die Untersuchungen sollen auch ein umfassendes Bild über den Einfluss kritischer Variablen der Beleuchtungsszene auf die Erkennbarkeit im Rahmen der hier angewandten Optimierungen geben. Hier stellt sich die Frage nach den Grenzen der Möglichkeiten, gute Sichtbedingungen bereitzustellen und dem Einfluss typischer Variablen auf die Beleuchtungsinstallation:

- (F2.a): *„Welchen Einfluss hat die Wahl der Beobachtungsform (statisch oder dynamisch) auf die Bestimmung der Erkennbarkeit?“*
- (F2.b): *„Welchen Einfluss haben die Eigenschaften der Beleuchtungsinstallation auf die Erkennbarkeit für die untersuchten LVK-Optimierungsvarianten?“*

Untersuchungsfeld 3 (U3) – Untersuchung der Aussagekraft und Vergleichbarkeit unterschiedlicher Qualitätskennzahlensysteme der Straßenbeleuchtung hinsichtlich der Erkennbarkeit mit Hilfe der Erkenntnisse aus U1.

Zur Bewertung der Beleuchtungsqualität unter ortsfester Straßenbeleuchtung existieren ausgiebige Untersuchungen zu den in den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.4 dargelegten Bewertungsmethoden. Sie befassen sich mit der Quantifizierung der Qualität anhand der Sichtverhältnisse. Aus dem Stand der Erkenntnisse zu diesen Methoden (siehe Unterkapitel 2.2) reicht deren Komplexität von der Verwendung einzelner Kennzahlen bis hin zu räumlich auflösenden Bewertungsmethoden. Dabei hat die Betrachtung der Verteilung einzelner Visibility Level Werte auf der Fahrbahn eine hohe Aussagekraft hinsichtlich der Erkennbarkeit. Sie berücksichtigt von den in Abschnitt 2.2.4 beschriebenen Bewertungsansätzen zur Quantifizierung des Merkmals Erkennbarkeit mehr als alle anderen herangezogenen Ansätze. Klare Ergebnisse lassen sich jedoch mit dieser Methode nur aufwendig erzielen, was dazu führt, vereinfachende Ansätze heranzuziehen, welche die Qualität der Sichtverhältnisse mittels nur einer Kennzahl

beschreiben. Hinsichtlich der hier verfolgten Optimierungsziele stellen sich bezüglich der Bewertung der Sichtverhältnisse auf der Fahrbahn daher die wesentlichen Forschungsfragen:

(F3.a): *„Lassen sich mit den unterschiedlichen, in sich schlüssigen Bewertungssystemen gleichwertige Aussagen zu den Erkennbarkeiten und der darauf basierenden Qualität der Beleuchtung treffen?“*

(F3.b): *„Ist eine Bewertung der Erkennbarkeit von Objekten hinreichend mit einer einzelnen Kennzahl zu beschreiben oder ist eine hinreichende Beschreibung erst anhand der Kombination mit einer Verteilung von Einzelwerten für ein Bewertungsfeld gegeben?“*

Untersuchungsfeld 4 (U4) – Betrachtung des sekundären Optimierungsziels „Minimierung des Energiebedarfes“ anhand der Bewertungskennzahl Lichtstrom

Obwohl die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer bei einer Optimierung der LVK in der ortsfesten Straßenbeleuchtung höchste Priorität genießt, stellt ein möglichst niedriger Energiebedarf der Beleuchtungsanlage entsprechend U1 ein weiteres, nicht zu vernachlässigendes Ziel dar. Dieser Fokus wird vor allem dann interessant, wenn es bei der Bereitstellung gleich guter Erkennbarkeiten und/oder gleichem Beleuchtungsniveau, Optimierungsvarianten gäbe, welche dies mit einem wesentlich niedrigeren Lichtstrom erzielen könnten als andere. Als zentrale Forschungsfrage gilt hier:

(F4): *„Gibt es unter den untersuchten Varianten eine Optimierung, welche bei gleich guter Erkennbarkeit auf vergleichbarem Beleuchtungsstärke- bzw. Leuchtdichtenniveau weniger Lichtstrom benötigt?“*

An dieser Stelle muss klar zwischen gleich hohem Beleuchtungsniveau anhand mittlerer Leuchtdichten oder Beleuchtungsstärken und gleich hohen Erkennbarkeiten differenziert werden, da diese nicht zwingend miteinander zusammenhängen.

3.2 GETROFFENE FESTLEGUNGEN

Zur Eingrenzung und Präzisierung der aus den zentralen Forschungsfragen abgeleiteten Arbeitshypothesen werden zunächst einige Festlegungen getroffen:

3.2.1 ZUSAMMENFASSENDE BEGRIFF DES BELEUCHTUNGSNIVEAUS

Es soll für die gesamte Untersuchung eindeutig definiert sein, dass das Beleuchtungsniveau im Folgenden nicht ausschließlich die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke im Bewertungsfeld beschreibt, sondern darüber hinaus auch die mittlere vertikale Beleuchtungsstärke und die mittlere Leuchtdichte umfasst und somit als übergeordnete Umschreibung gilt. Wird nach dem Beleuchtungsniveau einzelner lichttechnischer Kennzahlen differenziert, wird dies explizit erwähnt.

3.2.2 LICHTSTÄRKEVERTEILUNG UND LICHTVERTEILUNG

Jede beteiligte Leuchte wird ausschließlich durch die Koordinaten des Lichtschwerpunktes als Punktlichtquelle beschrieben. Dieser ist zugleich Ursprung des LVK. Hierbei wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass die räumliche Ausdehnung der Leuchte nicht berücksichtigt wird. Die dadurch resultierende Unsicherheit wird in Unterkapitel 7.3 der Unsicherheitsbetrachtung diskutiert. Die Ausrichtung des Koordinatensystems erfolgt anhand der CIE-Definition entsprechend Abbildung 2.1, aus Abschnitt 2.1.1. Alle Leuchten besitzen eine dreidimensional identische LVK.

Da wesentliche Teile dieser Arbeit darin bestehen, wie das von einer Lichtquelle emittierte Licht auf einer Bewertungsfläche verteilt werden kann und soll, ist es an dieser Stelle wichtig, eine Differenzierung zwischen der Verteilung des Lichtes aus der Lichtquelle heraus und dem Charakter der beleuchteten Fläche zu treffen.

Die Beschreibung der Beleuchtung der Bewertungsfläche erfolgt daher mittels der „Lichtverteilung“, bezüglich der Leuchtdichte sowie der vertikalen oder horizontalen Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn innerhalb des Bewertungsfeldes.

3.2.3 INSTALLATIONSGEOMETRIE UND FAHRBAHNEIGENSCHAFTEN

Die Arbeit betrachtet bewusst lediglich einreihige Leuchtenanordnungen, da diese hinsichtlich der Gewährleistung guter Kontraste und Gleichmäßigkeiten die kritischeren und herausforderndsten sind [vgl. ENZMANN 1977, S. 58].

Die Leuchtenposition wird anhand von Lichtpunkthöhe H und Querversatz des Lichtschwerpunktes zur x-Achse, welche das Bewertungsfeld auf der Leuchtseite begrenzt, definiert. Der Leuchtenabstand S ist über die Bewertungsfeldlänge definiert. Die weiteren Zusammenhänge sind Abbildung 3.1 zu entnehmen.

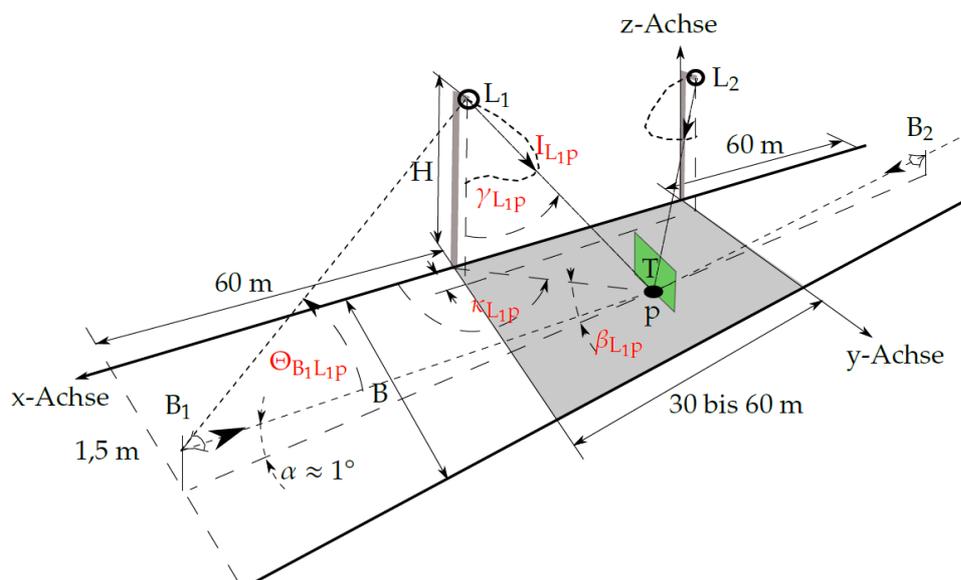


Abbildung 3.1 Geometrie- und Winkelkonventionen für Leuchten und Beleuchtungsszene, Grafik aus [STEBLAU 2013].

L_1, L_2	=	Leuchte, Lichtpunkt
B_1, B_2	=	Beobachterposition
$I_{L_1,P}$	=	Lichtstärke, die von L_1 auf P trifft
$\gamma_{L_1,P}$	=	Einstrahlwinkel zwischen Z-Achse und der kürzesten Verbindung zwischen P und L_1
$\kappa_{L_1,P}$	=	Azimutwinkel, ab der ersten photometrischen Achse
$\beta_{L_1,P}$	=	Versatzwinkel zwischen vertikaler Lichteinfalls- und Beobachtungsebene
α_B	=	Beobachtungswinkel
$\Theta_{B,L_1,P}$	=	Winkel zwischen der Achse der kürzesten Entfernung vom Beobachtungs- zu Bewertungspunkt und der Achse zwischen Beobachtungs- und Lichtpunkt

Einschränkender Weise wird die Anzahl der Lichtstrahlen einer LVK als endlich und diskret, aufgefasst. Dadurch kann jeder Lichtstrahl innerhalb des verwendeten (C, γ) -Koordinatensystems eindeutig durch seine C - und γ -Winkelkomponente sowie seinen Lichtstärkewert beschrieben werden und ist nur einmal je LVK vertreten. Ihm werden eine eindeutige Identifikationszahl innerhalb des Koordinatensystems des Straßenraumes und ein Bewertungspunkt P nach Abbildung 3.1 zugeordnet, so dass jeder Bewertungspunkt von nur einem Lichtstrahl der jeweiligen LVK der Leuchte getroffen werden kann [vgl. STEBLAU 2013, S. 29]. Die Anzahl der betrachteten Lichtstrahlen ist maßgeblich für den Rechenaufwand in den Simulationen.

Aufgrund der Transformationen zwischen Kugelkoordinatensystem der LVK und kartesischem Koordinatensystem des Bewertungsfeldes sowie der groben Rasterungen der r -Tabellen für die Fahrbahndeckschichten kann es zu Sprüngen zwischen benachbarten, berechneten Lichtstärkewerten der LVK kommen, die praktisch nicht realisierbar sind. Zur Minimierung dieses Effektes wird sichergestellt, dass nur ein begrenzter Lichtstärkesprung zwischen zwei benachbarten Lichtstrahlen möglich ist und so die Abweichung prozentual je Grad Winkelabstand einen Maximalwert nicht überschreiten darf. Hierzu werden für jeden Lichtstrahl zwei „Nachbarschaftsbeziehungen“ definiert, welche wechselseitig für jeweils zwei dieser Strahlen gelten. Zu jeder dieser „Nachbarschaftsbeziehungen“ wird der Winkelabstand $\Delta\gamma$ in Grad bestimmt, für welchen gilt:

$$\Delta\gamma_{a,b} = \Delta\gamma_{b,a} \quad (3.1)$$

Aufgrund der Festlegung der Abweichungsbegrenzung für beide Lichtstrahlen gilt

$$\frac{|I_a - I_b|}{I_b} \leq A \cdot \Delta\gamma_{b,a} \quad (3.2)$$

und äquivalent dazu

$$\frac{|I_b - I_a|}{I_a} \leq A \cdot \Delta\gamma_{a,b} \quad (3.3)$$

mit

- I Lichtstärkewert des betrachteten Lichtstrahls,
- a, b Indizes der benachbarten Lichtstrahlen,
- $\Delta\gamma$ Winkelabstand zwischen zwei benachbarten Lichtstrahlen,
- A maximaler prozentualer Lichtstärkesprung pro Grad zwischen zwei Lichtstrahlen der LVK.

Um die Allgemeingültigkeit der Arbeit zu gewährleisten, wird die Geometrie relativ beschrieben. Ausgangspunkt der Beschreibung ist die Lichtpunkthöhe H , für welche synonym die Bezeichnung „Masthöhe“ verwendet wird.

Die im Rahmen dieser Arbeit angestrebten niedrigen Beleuchtungsniveaus werden für die Vergleichbarkeit der Untersuchungen mit angrenzenden Forschungen in die bestehende Kategorisierung nach DIN [2007A; DIN 2007E] eingegliedert. Demnach ergeben sich die Leuchtdichtekategorie ME4 und die vergleichbaren Beleuchtungsstärke-Klassen C4 und S2 der Bewertung mittels der horizontalen Beleuchtungsstärke. Die Klassen bilden die Majorität der Straßen mit Verteilcharakter. Die Übersicht der lichttechnischen Anforderungen an diese Klassen zeigt Tabelle 3.2. Eine Entscheidung für diese Beleuchtungsniveaus wird durch die Ergebnisse der Untersuchungen von WALTHERT [1973] gestützt, nach welchen eine Steigerung des Leuchtdichteniveaus bei hohen Gleichmäßigkeiten über 4 cd/m^2 als kaum mehr wirksam bezeichnet werden kann. Interessant sind daher besonders die Bereiche mittlerer Leuchtdichten der Straßenbeleuchtung kleiner 2 cd/m^2 , um dort die Gleichmäßigkeit zu untersuchen.

Die Fahrbahnbreite beträgt $W_S = 8 \text{ m}$. Aus Bestandsaufnahmen umfangreicher Voruntersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Innovative Beleuchtung“ [SCHADE ET AL. 2009; SCHADE ET AL. 2010; SCHADE & VÖLKER 2011] hat sich für die untersuchten Beleuchtungsklassen diese Breite als repräsentativ erwiesen, so dass die durchgeführten Simulationen auf dieser Fahrbahnbreite basieren. Der Mastabstand wird als relativer Lichtpunkt Abstand $S_{\text{rel}} = H:S$ als relativem Quotient aus Lichtpunkthöhe zu Lichtpunkt Abstand S oder absolut, entsprechend dem gewählten Lichtpunkt Abstand der Simulation angegeben. Im Rahmen der Simulationen wird die Fahrbahn in zwei Fahrstreifen mit entgegen fließendem Verkehr aufgeteilt: $W_S = 2 \cdot W_L$. Eine Übersicht über die untersuchte Installationsgeometrie gibt Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: In der Parameterstudie untersuchte Beleuchtungsszenen.

Parameter	Ausprägung
Anzahl der Fahrstreifen	2
Breite je Fahrstreifen	4 m
Abstand des Beobachters	60 m
Höhe des Beobachters	1,5 m
Lichtpunkthöhe	6 m
Überhang des Lichtpunktes	0 m
Länge des Bewertungsfeldes	18 m, 24 m, 30 m

Die Fahrbahndeckschicht wird in ihren Reflexionseigenschaften durch r -Tabellen nach Kapitel 2.1.2 beschrieben. Die dynamische Beobachtung beschränkt sich auf die R2- und R3-Klasse, da sie nach EBERBACH [1973, S. 118] mit 65 % den Großteil der Straßen Deutschlands abdecken.

Tabelle 3.2: *Lichttechnische Anforderungen an die in der Arbeit verwendeten Beleuchtungsklassen nach [DIN 2007A; DIN 2007E].*

Beleuchtungsklasse	ME 4a	ME 4b	CE 4	S2
Leuchtdichteniveau \bar{L}	0,75 cd/m ²	0,75 cd/m ²	-	-
Beleuchtungsstärkeniveau \bar{E}	-	-	10 lx	10 lx
Gesamtgleichmäßigkeit U_o	0,4	0,4	0,4	¹²
Längsgleichmäßigkeit U_l	0,6	0,5	-	-
Schwellenwerterhöhung TI in %	15	15	15	-

Nachdem Untersuchungen von EBERBACH [1973] und ENZMANN [1977] zu LVK-Optimierungen gezeigt haben, dass leuchtdichte- und erkennbarkeitsoptimierte Beleuchtungsanlagen sowohl hinsichtlich der Leuchtdichte- als auch der Erkennbarkeit nur bei der Deckschicht hochwertige Ergebnisse erzielen, für die sie eigens ausgelegt sind [ENZMANN 1977, S. 56], erfolgt die Auswertung einer Deckschicht ausschließlich mit der auf sie selbst angepassten LVK. Das Verwenden anderer Deckschichteigenschaften führt nach Enzmann und Eberbach zu teils drastisch verschlechterten Ergebnissen.

3.2.4 BEWERTUNGSFELD

Das Bewertungsfeld orientiert sich, aufgrund der angestrebten Vergleichbarkeit zu aktuellen Arbeiten und Standards, an den Konventionen des ANSI IESNA RP 8-00 und der EN 13201. Es umfasst in der Breite die beiden Fahrstreifen und wird entsprechend Abbildung 3.2 durch zwei einseitig angeordnete Leuchten begrenzt. Die Bewertungsebene befindet sich in der Ebene der Fahrbahndeckschicht. Im Rahmen dieser Untersuchung sind die Begriffe „Messfeld“ und „Bewertungsfeld“ als äquivalent zu betrachten und beschreiben nach Abbildung 3.2 den Bereich auf der Fahrbahn, für welchen sämtliche Berechnungen durchgeführt werden. Die Bereiche außerhalb des Messfeldes werden nicht differenziert berücksichtigt. Dementsprechend sind die Messpunktabstände von Beginn des Bewertungsfeldes entlang nach Tabelle 3.1 der Fahrbahn folgend in Tabelle 3.3 angelehnt an den ANSI IESNA RP 8-00 und die EN 13201 definiert:

Tabelle 3.3: *Lage der Messpunkte längs des Bewertungsfeldes für die in den Untersuchungen angewandten Leuchtenabstände 18 m, 24 m, 30m.*

Leuchtenabstand [m]	Messpunktpositionen längs des Bewertungsfeldes [m]										
18	0,9	2,7	4,5	6,3	8,1	9,9	11,7	13,5	15,3	17,1	
24	1,2	3,6	6,0	8,4	10,8	13,2	15,6	18,0	20,4	22,8	
30	1,5	4,5	7,5	10,5	13,5	16,5	19,5	22,5	25,5	28,5	

Jede Fahrbahn wird im Fall der Bewertung nach dem Leuchtdichteansatz separat betrachtet, um zu gewährleisten, dass der Sicherheit eines jeden Verkehrsteilnehmers Rechnung getragen wird. Ebenso erfolgt die Auswertung der Erkennbarkeiten differenziert nach Fahrspuren. Die untersuchte Fahrbahn im Bereich des Bewertungsfeldes teilt sich in zwei Fahrspuren gleicher Breite. Auf diese Weise wird die Auswirkung des Querversatzes berücksichtigt, um den das Sehobjekt von der Achse der Leuchtenanordnung entfernt ist.

¹² Die Gesamtgleichmäßigkeit der S-Klassen ist nicht explizit vorgegeben, kann aber anhand der geforderten Mindest- und Mittelwerte der horizontalen Beleuchtungsstärke kontrolliert werden [vgl. DIN 2007E, S. 9 f.; vgl. DIN 2007F, S. 33 f.].

prozesses. In der praktischen Anwendung ist diese Methode jedoch sehr aufwendig, da das Leuchtdichtemessgerät oder die Leuchtdichtekamera für jede Objektposition versetzt werden muss. Die Optimierung der LVK auf das VL erfolgt zugunsten der Vergleichbarkeit zu bisherigen Arbeiten ausschließlich unter Berücksichtigung der dynamischen Beobachtung nach dem Fixed-Distance-Prinzip.

Entsprechend [CIE 1981A; CIE 1981B; IESNA 2005] wird die Darbietungszeit des Objektes für die Ermittlung des VL mit $t = 0,2$ s angenommen. Der Faktor zur Berücksichtigung einer Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 99,9 % wird zu $k_p = 2,6$ festgelegt.

Die in den hier vorgestellten Untersuchungen herangezogenen Laborexperimente zur Erkennbarkeit basieren darüber hinaus auf dem Prinzip der fovealen Beobachtung. Alle Werte gelten also dafür, dass der Beobachter exakt in Richtung des Objektes sieht. Objektpositionen, welche außerhalb dieses Bereiches liegen, werden in diesen Untersuchungen nicht berücksichtigt¹³.

3.2.6 SEHOBJEKT

Die in den Untersuchungen verwendeten Sehojekte umfassen die Reflexionsgrade $\rho_o = 6,5$ %, $\rho_o = 10$ %, $\rho_o = 20$ %, und $\rho_o = 40$ %. Entsprechend der Verteilung der kumulativen Häufigkeit der Detektionswahrscheinlichkeit von Passantenkleidung in Abhängigkeit ihres Reflexionsgrades nach NARISADA [2003, S. D4-52], WALDRAM [1938, S. 178] und SMITH [1938] ergeben sich nach Abbildung 2.10 in Abschnitt 2.2.4.13 folgende Richtwerte nach Tabelle 3.4:

Tabelle 3.4: Kumulierte Häufigkeit der Wahrscheinlichkeit des Erkennens von Sehojekten für die herangezogenen Sehojektreflexionsgrade nach [SMITH 1938; WALDRAM 1938].

Reflexionsgrad des Sehojektes	Kumulierte Wahrscheinlichkeit gerade erkennbarer Sehojekte unter der Bedingung $ VL \geq 1$ bei verwendetem Silhouette-Prinzip, kurz Revealing Power $RP_{\text{Silhouette}}$
6,5 %	64 %
10 %	73 %
20 %	90 %
40 %	98 %

An dieser Stelle sollen die beiden Begriffe „typisches“ und „kritisches Sehojekt“ definiert werden, um die differenzierte Betrachtung der Ergebnisse bezüglich der Erkennbarkeiten, abhängig vom Reflexionsgrad des Sehojektes zu stützen. Nach Kapitel 2.2.4.3 weisen über 50 % typischer Fußgängerbekleidung einen Reflexionsgrad von $\rho_o \leq 20$ % auf. Zudem liegt die kumulierte Wahrscheinlichkeit der Erkennung dieser Objekte nach Tabelle 3.4 bei 90 %, sofern sie Negativkontraste aufweisen. Das $\rho_o = 20$ %-Objekt deckt, nach den Untersuchungen von Smith und WalDRAM sowie nach den Untersuchungen von GOLDMANN [1956A; 1956B], KOSMATKA [2003], NARISADA [2003], einen großen Anteil typischer Personenbekleidung ab und bietet daher eine angemessene Aussagekraft der Objektdetektion für die Bekleidung von Fußgängern, so dass es im Folgenden als typisches Sehojekt hinsichtlich seines Reflexionsgrades bezeichnet wird. Gerade bei Negativkontrasten (Silhouette-Prinzip) ist ein hellgraues

¹³ Umfangreiche Untersuchungen zum extrafovealen Sehen führten neben PÖPPEL & HARVEY [1973] und JOHNSON ET AL. [1978] vor allem Adrian in unter anderem [ADRIAN & GIBBONS 1993] durch. Angelehnt an die Bestimmung der Erkennbarkeit nach ANSI IESNA RP-8-00 untersuchte er die Abhängigkeit von Wahrnehmungsschwellen von der Größe des Sichtfeldes und bestätigte die Aussagekraft der nach RP-8-00 herangezogenen Methode [ADRIAN & GIBBONS 1993, S. 739].

Sehobjekt mit einem Reflexionsgrad von $\rho_o = 40\%$ nur sehr schwer erkennbar. Es soll daher bewusst, wie bereits in Kapitel 2.2.4.3 beschrieben, als kritisches Sehobjekt betrachtet werden. Einen Reflexionsgrad von $\rho_o \geq 40\%$ weisen weniger als 20% der von Goldmann untersuchten Kleidungsproben auf. Es kann also im Falle des Silhouette-Prinzips für mehr als 80% der Fußgängerbekleidungen eine Aussage getroffen werden. Dazu beträgt nach Abbildung 2.10 $RP_{\text{Silhouette}} > 98\%$, so dass eine hohe und repräsentative Aussagekraft über die Erkennung bei Negativkontrasten vorliegt.

3.2.7 KONTRASTPRINZIP DER ERKENNBARKEITSOPTIMIERUNG

Ortsfeste Straßenbeleuchtung kann Negativkontraste und/oder Positivkontraste verursachen. Findet im Verlauf der Fahrbahn ein Kontrastwechsel statt, zieht das Kontrastverflachungen sowie eine Kontrastumkehr und dadurch bedingte, sehr schlechte Erkennbarkeiten nach sich. Im Vorfeld einer Optimierung auf die Erkennbarkeit muss die Entscheidung getroffen werden, entweder auf positive oder negative Objektkontraste zu optimieren, da sonst das Risiko von Kontrastumkehrungen und –verflachungen zu groß wäre. Die Optimierung auf Sehobjekt-Negativkontraste wird als Silhouette-Prinzip bezeichnet. Dagegen findet beim Non-Silhouette-Prinzip eine Optimierung auf den Positivkontrast statt. Da dunkle Sehobjekte mit Negativkontrast besser zu erkennen sind als helle Sehobjekte mit Positivkontrast [AULHORN 1964; IESNA 2005] und die Kleidung von Verkehrsteilnehmern vorwiegend Reflexionsgrade kleiner 50% aufweist (vgl. Kapitel 2.2.4.3), findet in dieser Arbeit die Optimierung auf Negativkontraste nach dem Silhouette-Prinzip statt.

Um die Adaptationsbedingungen ausreichend zu berücksichtigen, reicht die Betrachtung des Kontrastes allein nicht aus, so dass die Visibility-Level-Methode für flache Sehobjekte angewandt wird. Abschnitt 2.2.4.3 diskutiert, warum eine Betrachtung dreidimensionaler Sehobjekte nicht zwingend erforderlich ist und daher vernachlässigt werden kann. Da in den Simulationen nach Kapitel 5 ausschließlich die Fahrbahn zur Berücksichtigung der adaptionsbestimmenden Hintergrundleuchtdichte herangezogen wird, soll als Konvention vereinbart werden (siehe Abbildung 3.3, rechts):

$$L_{\text{umf}} = L_{\text{ad}} = L_{\text{Fahrbahn}} \tag{3.4}$$

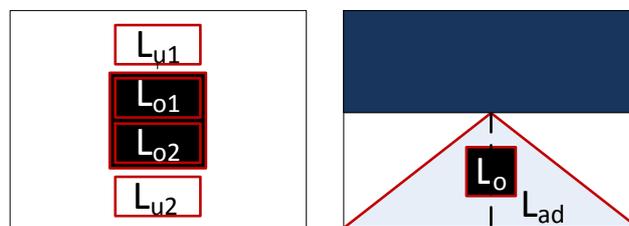


Abbildung 3.3: Links Untergrundleuchtdichte im Falle der Bestimmung des Kantenkontrastes, rechts adaptionsbestimmende Umfeldleuchtdichte in Form der Fahrbahnleuchtdichte.

Da im Rahmen der Optimierung vier verschiedene Sehobjekte mit einem Reflexionsgrad von bis zu 40% berücksichtigt werden, sind bei einer erfolgreichen Optimierung auch gute RP -Werte gewährleistet.

3.3 DEFINITION DER ARBEITSHYPOTHESEN

Aus den Forschungsfragen der vier Untersuchungsfelder nach Unterkapitel 3.1 lassen sich folgende Arbeitshypothesen H1 zur Prüfung von Umsetzung und Untersuchung der optimierten Lichtverteilungen zur Bereitstellung guter Erkennbarkeit nach U1 ableiten. Mit ihnen wird herausgestellt, welcher der herangezogenen und als sinnvoll anwendbar geltenden Optimierungsansätze die beste Erkennbarkeit und somit die höchste Sicherheit bereitstellt.

(H1.a) – Umsetzung der Ziele der ausgewählten Optimierungsmethoden:

Die Ziele einer jeden Optimierungsmethode werden mittels eines innerhalb der Arbeit entwickelten Optimierungswerkzeuges hinreichend erfüllt.

(H1.b) – Untersuchung der Qualitätskriteriums Gleichmäßigkeit:

Auf die Gesamtgleichmäßigkeit von Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte optimierte LVK führen nicht zwingend zu guten Erkennbarkeiten.

(H1.c) – Untersuchung der Erkennbarkeit bei homogener Leuchtdichteverteilung und homogener Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke:

Eine homogene Fahrbahnleuchtdichteverteilung bewirkt bessere Erkennbarkeiten als eine homogene Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke.

(H1.d) – Untersuchung erkennbarkeitsoptimierter Ausleuchtung nach VL:

Die Optimierung VL-Minima erzielt gleichmäßigere VL-Verläufe als die gleichmäßigkeitsorientierten Optimierungsmethoden auf Basis der Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte, da Kontrastverflachungen und -umkehrungen vermieden werden.

(H1.e) – Untersuchung der Erkennbarkeit bei homogener vertikaler Beleuchtungsstärke:

Eine Optimierung auf eine gleichmäßige Verteilung der vertikalen Beleuchtungsstärke liefert Verläufe insgesamt größerer VL als der leuchtdichtebasierte Ansatz.

Um ein umfassendes Bild über den Einfluss kritischer Variablen der Beleuchtungsszene auf die Erkennbarkeit zu erhalten, erfolgt die Untersuchung des Einflusses der Beleuchtungsinstallation und der Beobachtungsform auf die Erkennbarkeit nach U2 anhand der Arbeitshypothesen H2.

(H2.a) – Betrachtung des Einflusses des Sehobjektreflexionsgrades bei der Bestimmung Erkennbarkeit:

Es gibt einen kritischen Sehobjektreflexionsgrad, ab welchem eine LVK-Optimierung nach dem Silhouette-Prinzip keine hinreichenden VL bereitstellt.

(H2.b) – Betrachtung des Zusammenhangs von den Straßendeckschichtcharakteristiken und der Erkennbarkeit, die durch die jeweilige Optimierungsmethode bereitgestellt wird:

Die Wahl der Straßendeckschicht hat einen nachweisbaren Einfluss auf die durch die Optimierungsmethoden erzielbaren Erkennbarkeiten.

(H2.c) – Betrachtung des Einflusses des relativen Mastabstandes auf die Erfüllbarkeit der Optimierungsziele der untersuchten Optimierungsmethoden:

Es gibt einen kritischen Mastabstand, ab welchem eine Optimierung der LVK keine hinreichend guten Ergebnisse für qualitativ hochwertige, sichere Straßenbeleuchtung bereitstellen kann. Dieser kann je nach Optimierungsziel unterschiedlich ausfallen.

(H2.d) – Betrachtung des Einflusses der Beobachtungsart auf die Erkennbarkeit:

Zur Vereinfachung von Erkennbarkeitsbewertungen in der Praxis ist es aufgrund der geringen Abweichungen bei den VL-Werten ausreichend, das Prinzip des stationären Beobachters mit bewegtem Objekt anzuwenden.

Die Bearbeitung der Arbeitshypothesen H1 und H2 erfolgt anhand unterschiedlicher Qualitätskennzahlensysteme. Um Schlüsse über deren Aussagekraft und Vergleichbarkeit hinsichtlich der Erkennbarkeit zu ziehen, werden die Arbeitshypothesen H3 entsprechend des Untersuchungsfeldes 3 definiert.

(H3.a) – Untersuchung der Aussagekraft unterschiedlicher Qualitätskennzahlensysteme zur Bewertung der Erkennbarkeit:

Die Erfassung der Erkennbarkeit von Objekten weist nicht bei allen Kennzahlensystemen ausreichend auf Bereiche kritischer Erkennbarkeit hin.

(H3.b) – Untersuchung der Vergleichbarkeit beleuchtungsstärke- und leuchtdichte-basierter Qualitätskennzahlensysteme gegenüber der direkten Bewertung der Erkennbarkeit anhand des VL:

Eine Beschreibung der Sichtverhältnisse auf der Fahrbahn anhand der Kombination aus Gleichmäßigkeit und Mittelwert der Verteilung von Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte ist kein vollständiger Ersatz für eine direkte Bewertung der Sichtverhältnisse anhand der Erkennbarkeit von Objekten.

Neben der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer stellt ein möglichst niedriger Energiebedarf der Beleuchtungsanlage entsprechend U1 ein weiteres, nicht zu vernachlässigendes Ziel dar. Die Analyse des Einsparpotentials durch die Minimierung des Lichtstromes (U4) erfolgt für die berechneten LVK und Lichtverteilungen anhand der beiden Hypothesen H4.

(H4.a) – Betrachtung des Lichtstrombedarfes bei Erfüllung des primären Optimierungsziels:

Bei vergleichbarer Erkennbarkeit resultiert bei der LVK-Optimierung auf die Leuchtdichtegleichmäßigkeit ein niedrigerer Lichtstrombedarf als bei einer Optimierung auf die Gesamtgleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke.

(H4.b) – Vergleichende Betrachtung des Lichtstrombedarfes erkennbarkeitsorientierter und gleichmäßigkeitsorientierter Optimierungsmethoden:

Wird eine LVK direkt auf die Erkennbarkeit optimiert, können damit Erkennbarkeiten erreicht werden wie bei homogenen Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteverteilungen, jedoch bei niedrigerem Lichtstrombedarf.

3.4 UMFANG DER OPERATIONALISIERUNG

Die Maßnahmen der einzelnen durchgeführten Untersuchungen, auch als unabhängige Variablen UV bezeichnet, werden hinsichtlich ihres Merkmales, ihrer Kennzahl und deren Ausprägungen in Tabelle 3.5 aufgeführt. Die Merkmale Mastabstand, Fahrbahndeckschicht und Sehobjektreflexionsgrad für die Optimierungen bei dynamischer und stationärer Beobachtung sind im vollen Umfang in den Abbildungen A.1 und A.2 des Anhangs aufgeführt.

Tabelle 3.5: Angewandte Maßnahmen der Untersuchung.

Optimierungsansätze			
Optimierungsziel	operationalisiert durch AV	realisiert durch	Ausprägung
Sicherheit	ΔL , C, VL, STVL, TI	LVK, Sehobjekt, Fahrbahndeckschicht	$U_{0,E\text{ hor}} \Rightarrow \max$ $U_{0,E\text{ ver}} \Rightarrow \max$ $U_{0,L} \Rightarrow \max$ $ VL _i \Rightarrow \max$
Energieeffizienz	aufgewendeten Lichtstrom	Lichtstrom der LVK	$\Phi \Rightarrow \min$
Einflussgrößen auf die Lichtverteilungen			
Merkmal (UV)	operationalisiert durch AV	Umfang der Ausprägung	
Relativer Mastabstand	Verhältnis	1:3, 1:4, 1:5	
Fahrbahndeckschicht	q_i ; r-Tabellen; q_0	(R1; 0,1), (R2; 0,07), (R3; 0,07), (R4; 0,08), (C1; 0,1), (C2; 0,07)	
Sehobjekt	Reflexionsgrad ρ_o	6,5 %; 10 %; 20 %; 40 %	
Beobachtungsart	Beobachtungsparameter	Dynamischer Beobachter (fixer Abstand zwischen Sehobjekt und Beobachter), stationärer Beobachter (fixe Beobachtungsposition, Sehobjekt bewegt sich von Beobachter weg)	
Beobachterposition	Fahrspur	Den Leuchten zugewandt (Fahrspur 0) oder abgewandt (Fahrspur 1)	

Insgesamt werden 78 Beleuchtungssituationen untersucht, von denen 42 (beschränkt auf R2- und R3-Deckschicht) die Grundlage des Vergleichs zwischen dynamischer und stationärer Beobachtung bilden. Der Vergleich der VL-Optimierung erfolgt ebenfalls für diese 42 Installationen. Eine Übersicht über die Untersuchungsschwerpunkte gibt Tabelle A.3 des Anhangs.

Bei der Erfassung der Sicherheit wird neben der Erkennbarkeit die Kombination aus Beleuchtungsniveau und Gleichmäßigkeit nach Kapitel 2.2.2 herangezogen, entsprechend dem aktuellen Stand der Normung [DIN 2007D; BSI 2012; IESNA 2005; CIE 2010A]. Das Beleuchtungsniveau ist definiert als arithmetischer Mittelwert der jeweiligen lichttechnischen Kennzahl. Die Gesamt- und Längsgleichmäßigkeit werden nach Kapitel 4.3 berechnet. Das Gütemerkmal Erkennbarkeit wird anhand der Verläufe von Einzelwerten des VL angelehnt an [IESNA 2005] bewertet. Hierfür werden als Kennzahlen auch Minima, Mittelwerte und Mediane berücksichtigt. Als Berechnungsgrundlage wird die VL-Berechnung nach den Gleichungen (2.26) bis (2.32) nach dem Ansatz von Adrian in ANSI IESNA RP 8-00 nach den Abschnitten 2.2.4.1 und 2.2.4.11 herangezogen. Diese werden dann mit zusammenfassenden Qualitätskennzahlen, wie dem Small Target Visibility Level (STVL) nach Kapitel 2.2.4.12 und

dem Threshold Increment (*TI*) nach Unterpunkt „Quantifizierung der Blendung“ aus Kapitel 2.2.4.1 verglichen. Der Energiebedarf wird anhand des Lichtstromes bewertet, welcher benötigt wird, um bei optimierter LVK das vorgegebene Beleuchtungsniveau zu erreichen.

Die Erfassung der Wirkungen, also den abhängigen Variablen (*AV*), erfolgt anhand des Primärzieles und des Sekundärzieles für das Optimierungskonzept. Die Überführung dieser Ziele lässt sich wie in Tabelle 3.6 folgt darstellen.

Tabelle 3.6: Den Hauptoptimierungszielen zugeordnete Wirkungen

<i>Übergeordnetes Optimierungsziel</i>	<i>Wirkung (zugeordnete abhängige Variable)</i>
„Ermögliche eine hohe Sicherheit für die Verkehrsteilnehmer“	Visibility Level <i>VL</i> bzw. Small Target Visibility Level <i>STVL</i> Beleuchtungsniveau \bar{L} , \bar{E}_{hor} , \bar{E}_{ver} Gesamtgleichmäßigkeit U_o Längsgleichmäßigkeit U_l Threshold Increment Faktor T_l
„Halte de Energiebedarf des Systems kleinstmöglich“	Lichtstrom bzw. <i>VL</i>

4

GENERIERUNG OPTIMierter LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKÖRPER

An dieser Stelle wird das Vorgehen zur Optimierung der Lichtstärkeverteilungskörper (LVK) für die vier ausgewählten Optimierungsmethoden beschrieben. Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit das Berechnungsprogramm LiDot entwickelt. Mit diesem können für beliebige Installationsgeometrien und Fahrbahneigenschaften Optimierungen von LVK durchgeführt werden. Es berücksichtigt gleichmäßigkeits- und erkennbarkeitsorientierte Planungs- und Bewertungsansätze bei einreihigen Lichtpunktanordnungen.

Große Teile LiDots wurden im Rahmen der Diplomarbeit von STEBLAU [2013] entwickelt. Für tiefere Einblicke in die Programmstruktur und weitere Informationen zu Funktionen und Benutzeroberfläche, welche über den Rahmen der hier vorliegenden Arbeit hinausgehen, sei die entsprechende Arbeit von STEBLAU [2013] empfohlen.

4.1 ANSATZ

Für jede einzelne der untersuchten Beleuchtungsszenen werden individuelle Lichtstärkeverteilungskörper generiert. Das resultierende individuelle Optimierungsproblem aus dem zu Beginn in den Unterkapiteln 1.1 und 3.1 beschriebenen Zielkonflikt lässt sich durch eine Zielfunktion beschreiben, welche nur dann ausgeführt wird, wenn sie die Randbedingung des konkurrierenden Ziels erfüllt. Da die Sicherheit als das maßgebliche der beiden Optimierungsziele zu sehen ist, wird eine Optimierung auf das Sekundärziel, die Minimierung des Lichtstroms, nur dann durchgeführt, wenn das Primärziel, die hohe Sicherheit anhand hochwertiger Beleuchtungsqualität, für die jeweilige Beleuchtungssituation bereits gilt. Dementsprechend wird für die Optimierung der LVK folgende Verknüpfung eingeführt:

Primärziel „maximale Sicherheit“ \Leftrightarrow Randbedingung,

Sekundärziel „kleinstmöglicher Energiebedarf“ \Leftrightarrow Zielfunktion.

4.2 ZIELFUNKTION

Die Zielfunktion einer Minimierung des Energiebedarfes für eine definierte Beleuchtungsaufgabe ist aus lichttechnischer Sicht der LVK-Optimierung mittels einer Minimierung des

Gesamtlichtstroms Φ einer Leuchte zu erreichen. Bei der Betrachtung des Lichtstromes einer gesamten Anlage muss entsprechend die Anzahl der Lichtpunkte berücksichtigt werden. Die Verknüpfung zwischen der Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke E_{hor} und der Lichtquelle hängt im Wesentlichen von der Form der normierten LVK und dem Lichtstrom Φ der Lichtquelle ab. Nach der vereinfachten Beschreibung

$$\Phi = \sum_{i=1}^N I_i \cdot d\Omega_i \quad (4.1)$$

mit

- N = Anzahl der Lichtstrahlen der Lichtquelle,
- I_i = Lichtstärke des i-ten Lichtstrahls,
- $d\Omega_i$ = Raumwinkelprojektion, der durch den i-ten Lichtstrahl angestrahlten Teilfläche:

$$d\Omega_i = \frac{dA_i \cdot \cos y_i}{R_i^2} \Omega_0. \quad (4.2)$$

Dabei sind

- A_i = dem Messpunkt zugeordnetes Flächenelement,
- y_i = Winkel, unter dem der Lichtstrahl auf den Messpunkt trifft und
- R_i = Abstand zwischen Lichtquellen und dem Messpunkt.

Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Lichtstrom und Lichtstärke. Eine ungünstige LVK führt zu einem vermeidbaren Mehraufwand an benötigter Eingangsleistung der Leuchte zur Erfüllung der Anforderungen an die Ausleuchtung der Fahrbahn. Um eine Beleuchtung mit minimalem Energiebedarf zu erreichen, ist es somit primär zielführend, den Lichtstrom als Zielfunktion heranzuziehen. Gleichung (4.1) definiert die von den Lichtstärkewerten linear abhängige Zielfunktion. Somit eignen sich die Lichtstärkewerte der LVK im Sinne des Zielkonfliktes als Entscheidungsvariablen. Die Minimierung des Energiebedarfs ist dann erfüllt, wenn für die Zielfunktion Φ gilt:

$$\Phi \rightarrow \min \quad (4.3)$$

4.3 GLEICHMÄßIGKEITSORIENTIERTE OPTIMIERUNGEN

Da die Beleuchtungsklasse für eine Beleuchtungsszene anhand der Verkehrssituation als vorgegeben betrachtet werden soll und so als vorab definiert gilt, ist das Beleuchtungsniveau der Anlage bereits im Vorfeld für die Optimierung der LVK festgelegt. Bei sonst gleichen Beleuchtungsbedingungen folgt nach Kapitel 2.2.2, dass sowohl bei der Optimierung der Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahn, als auch im Falle der Optimierung der Verteilung der horizontalen und vertikalen Beleuchtungsstärke, die Maximierung der Gesamtgleichmäßigkeit U_0 maßgeblich für gute Sichtverhältnisse und ein Maß an Sicherheit ist und daher entsprechend als Optimierungsziel angewendet wird. Die Optimierung auf die Beleuchtungsstärke wird

darüber hinaus in die Optimierung nach horizontaler und vertikaler Beleuchtungsstärke (E_{hor} und E_{ver}) differenziert. Daher werden folgende U_0 -orientierte Randbedingungen eingeführt:

- a. $U_{0,\text{Ehor}} \rightarrow \max$ Optimierung der Gesamtgleichmäßigkeit der horizontalen Beleuchtungsstärke
- b. $U_{0,\text{Ever}} \rightarrow \max$ Optimierung der Gesamtgleichmäßigkeit der vertikalen Beleuchtungsstärke

Äquivalent gilt für die Gesamtgleichmäßigkeit der Leuchtdichte als Randbedingung:

- c. $U_{0,\text{L}} \rightarrow \max$ Optimierung der Gesamtgleichmäßigkeit der Leuchtdichte

Vorteil dieser drei Randbedingungen ist, dass die Maximierung der Gesamtgleichmäßigkeit unmittelbar eine Annäherung jeweiliger minimaler, mittlerer und maximaler Werte der entsprechenden lichttechnischen Größe bedingt. Dies führt bei der Festlegung des Mindestwertes des lokalen Beleuchtungsniveaus zwingend zu einer Minimierung der Lichtstärken im gesamten Bewertungsfeld und kommt so der sekundären Zielfunktion zugute. Eine allgemein übliche Beschreibung des Beleuchtungsniveaus über den Mittelwert der jeweiligen lichttechnischen Größe wird hier nicht angestrebt, da dies zu einem für die Beleuchtungssituation zu niedrigen Beleuchtungsniveau führen könnte. Bei dieser Methode besteht die Gefahr, dass Minima unterhalb des vorgegebenen Niveaus erzielt werden. Durch die Strategie, sich von oben dem Mindestwert zu nähern, wird gewährleistet, dass auch bei nicht vollkommen gleichmäßiger Beleuchtung der aus der Optimierung resultierende Mittelwert immer über dem angestrebten Mittelwert nach Vorgabe liegt.

4.3.1 HORIZONTALE BELEUCHTUNGSSTÄRKE

Für die Gesamtgleichmäßigkeit der horizontalen Beleuchtungsstärke gilt nach Formel (2.10) aus Abschnitt 2.2.2 und Randbedingung a. der Zusammenhang:

$$\begin{aligned} U_{0,\text{Ehor}} \rightarrow \max &\Leftrightarrow U_{0,\text{Ehor}} \rightarrow 1 \\ \Rightarrow \bar{E}_{\text{hor}} \rightarrow E_{\text{hor},\min} \mid E_{\text{hor},\min} = \text{const} \end{aligned} \quad (4.4)$$

- $E_{\text{hor},\min}$ = kleinste aller lokalen horizontalen Beleuchtungsstärken im Bewertungsfeld
- \bar{E}_{hor} = mittlere horizontale Beleuchtungsstärke als arithmetischer Mittelwert aller horizontalen Beleuchtungsstärken im Bewertungsfeld

Ausgehend vom photometrischen Entfernungsgesetz nach Formel (2.7) kann, sofern die Geometrie der Beleuchtungsanlage und die Lichtstärke in Richtung eines bestimmten Punktes bekannt sind, damit die Beleuchtungsstärke am Berechnungspunkt bestimmt werden. Da die LVK aus der Beleuchtungsstärke berechnet werden soll, muss diese Gleichung entsprechend nach der Lichtstärke umgeformt werden. Unter Kenntnis der Geometrie kann nun ebenso die Lichtstärke berechnet werden, die von der Lichtquelle ausgestrahlt werden muss, um eine gewünschte lokale Beleuchtungsstärke zu erzeugen. Da die Straßenbeleuchtung im Allgemeinen aber aus einer bestimmten Anordnung von Leuchten, meist einer oder mehrerer Reihen besteht,

ist anzunehmen, dass auf einen Berechnungspunkt Licht von mehreren Leuchten auftrifft. In diesem Fall setzt sich die Gesamtbeleuchtungsstärke an diesem Punkt aus den Einzelbeleuchtungsstärken der beteiligten Lichtquellen zusammen. Für die Berechnung der LVK, beziehungsweise deren Lichtstärken I_i , ist dies nun insofern problematisch, als dass dadurch unendlich viele Lösungen für I_i möglich sind. Dieses Problem kann durch geeignete Nebenbedingungen umgangen werden. Unter dem Aspekt der größten Effizienz liegt es nahe, den Abstand R zwischen jeweiligem Bewertungspunkt und Lichtquelle sowie den Azimutwinkel des betrachteten Lichtstrahls γ_2 so klein wie möglich zu halten. Das Licht muss also die kürzest mögliche Entfernung zum Bewertungspunkt zurücklegen und zudem möglichst steil auf die Bewertungsfläche auftreffen. Es eignet sich daher die Nebenbedingung, dass jeder Bewertungspunkt nur einmal und zwar von der je nächstgelegenen Leuchte beleuchtet wird. Durch dieses Vorgehen werden zugleich flache Abstrahlwinkel mit den verbundenen Blendeffekten und unnötig hohe Lichtstärken durch zu große Abstände von Bewertungs- zu Lichtpunkt vermindert. Zur konkreten LVK-Berechnung aus einer vorgegebenen Beleuchtungsstärkeverteilung wird die beleuchtete Fläche durch eine definierte Anzahl von Berechnungspunkten diskretisiert. Für jeden Berechnungspunkt wird nun die Lichtstärke berechnet. Aus der Geometrie der Beleuchtungsanlage nach Abbildung 3.1 auf Seite 39 können die beiden Winkel γ_1 und C berechnet und der Lichtstärke an diesem Punkt zugeordnet werden. Die Zuordnung der Lichtstärke zu den beiden Winkeln γ_1 und C ergibt die gesuchte LVK. Abhängig von der Art der Diskretisierung kann es erforderlich sein, das Ergebnis auf gleichabständige Winkel zu inter- bzw. extrapolieren.

4.3.2 VERTIKALE BELEUCHTUNGSSTÄRKE

Analog zum Optimierungsprozess der horizontalen Beleuchtungsstärke wird auch die Optimierung der LVK auf Basis der vertikalen Beleuchtungsstärke durchgeführt. Unter dem Aspekt einer möglichen Verbesserung des Objektkontrastes und somit der Erkennbarkeit von Objekten durch die Kombination aus mitstrahlendem und entgegenstrahlendem Licht wird der Ansatz des kürzesten Lichtweges in dieser Variante als Zielfunktion b. weniger radikal verfolgt als bei der horizontalen Beleuchtungsstärke. Bei der Optimierung der vertikalen Beleuchtungsstärke darf ein Punkt auf der Fahrbahn von allen Lichtpunkten beleuchtet werden, um die Gesamtgleichmäßigkeit zu verbessern. Dafür ist eine Summation mindestens zweier Lichtstrahlen (dementsprechend zweier Leuchten) in einem Punkt notwendig. Die vertikale Beleuchtungsstärke des Sehobjektes wird dafür jeweils in halber Objekthöhe entgegen der Fahrtrichtung bestimmt und bewertet. Die Berechnung der Gleichmäßigkeit erfolgt nach Gleichung (2.12) aus Kapitel 2.2.2.

4.3.3 LEUCHTDICHTE

Während die Optimierung der LVK auf eine maximale Gleichmäßigkeit von vertikaler oder horizontaler Beleuchtungsstärke nur von der Ausstrahlrichtung und der Entfernung zwischen Lichtquellen und Messpunkt abhängt, muss die Optimierung auf eine maximale Gesamtgleichmäßigkeit der Leuchtdichte entsprechend Randbedingung c. nach (2.10) aus Abschnitt 2.2.2 zusätzlich die Reflexion des Lichtes über die Fahrbahn hin zum Beobachter berücksichtigen. Diese wird maßgeblich von der Charakteristik der Fahrbahndeckschicht und den Lichteinfallswinkeln der zu berücksichtigenden Lichtquellen beeinflusst.

Mit der geometrischen Beziehung zwischen der Entfernung von Punkt $P(x_i, y_i)$ zur Lichtquelle R und Lichtpunkthöhe H nach $R = \cos \gamma / H$ und der Definition des reduzierten Leuchtdichte-koeffizienten $r = q \cos^3 \gamma$ für die Berücksichtigung der Reflexion an der Fahrbahnoberfläche lässt sich zur Bestimmung der Lichtstärken des Lichtstärkeverteilungskörpers aus der zu erzielenden Leuchtdichte $L(x_i, y_i)$ in diesem i -ten Punkt die erforderliche Lichtstärke $I(\gamma_i; \varphi_i)$ bestimmen:

$$\begin{aligned} I(\gamma_i; \varphi_i) &= L(x_i, y_i) \cdot \frac{R^2}{q(\gamma_i; \beta_i) \cdot \cos \gamma} \\ &= L(x, y) \cdot \frac{H^2}{q(\gamma_i; \beta_i) \cdot \cos^3 \gamma} = L(x, y) \cdot \frac{H^2}{r(\gamma_i; \beta_i)} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Die Optimierung der LVK auf die Gesamtgleichmäßigkeit der Leuchtdichte erfolgt mittels eines Optimierungsalgorithmuses auf Basis des global konvergenten Innere-Punkte-Verfahrens zur Lösung komplexer linearer Gleichungssysteme [ZHANG 1995] innerhalb der Matlab-Funktion „linprog“ [MATHWORKS 2015]. Diese erfordert die Umformung der Beschränkungsfunktion in die lineare Form der Ausgangsgleichung $A \cdot x \leq b$ jeder Leuchtdichterandbedingung aller N , in der Beleuchtungsszene vorkommenden Lichtstrahlen:

$$L_{p,i} = \sum_{i=1}^N \frac{r_i(\gamma_i; \beta_i) \cdot I_i(\gamma_i; \varphi_i)}{H_i^2} \quad (4.6)$$

Im Ansatz der vorliegenden Arbeit erfolgt die Optimierung der Gleichmäßigkeit indirekt. Grundgedanke der indirekten Herangehensweise ist, dass wenn die minimale Leuchtdichte fest definiert wird, ein Bereich $\Delta L = L_{\max} - L_{\min}$, in welchem die Optimierung der Zielfunktion durchgeführt wird, kleinst möglich gewählt wird. Ist eine Optimierung für diesen Bereich nicht möglich, so wird ΔL vergrößert und für den folgenden Optimierungsdurchlauf verwendet. Bei fest gewähltem L_{\min} gilt aufgrund der Minimierung der einzelnen Lichtstärken durch die Zielfunktion $\Phi \rightarrow \min$, dass $\bar{L} \rightarrow L_{\min}$ und folglich $U_{o,L} \rightarrow \min$. Sofern nach dieser Prozedur ein Ergebnis der Optimierung auf die Zielfunktion gefunden wird, geht diese automatisch mit der bestmöglichen Gesamtgleichmäßigkeit einher. Die resultierenden Einschränkungen je i -tem Berechnungspunkt entsprechen der Ausgangsform

$$-\sum_{i=1}^N \frac{r_i(\gamma_i; \beta_i) \cdot I_i(\gamma_i; \varphi_i)}{H_i^2} \leq -L_{\min} \quad (4.7)$$

und

$$\sum_{i=1}^N \frac{r_i(\gamma_i; \beta_i) \cdot I_i(\gamma_i; \varphi_i)}{H_i^2} \leq L_{\max}, \quad (4.8)$$

so dass

$$\sum_{i=1}^N \frac{r_i(\gamma_i; \beta_i) \cdot I_i(\gamma_i; \varphi_i)}{H_i^2} \rightarrow L_{\min}. \quad (4.9)$$

4.4 ERKENNBARKEITSORIENTIERTE OPTIMIERUNG

Die im Kapitel zuvor vorgestellten U_o -orientierten Randbedingungen werden entsprechend der in Kapitel 3.4 eingeführten Ausprägungen des primären Optimierungsziels durch eine erkennbarkeitsorientierte Randbedingung ergänzt (Optimierung Erkennbarkeit im Sinne des VL):

$$d. \quad |VL|_i \rightarrow \max \quad \text{Optimierung auf den Verlauf der } VL\text{-Einzelwerte}$$

Hier erfolgt keine Maximierung der Gesamtgleichmäßigkeit, sondern eine direkte Optimierung des VL_i -Verlaufes anhand der iterativen Anhebung der jeweils kleinsten VL -Einzelwerte innerhalb des Bewertungsfeldes je Optimierungsschleife, ähnlich dem Vorgehen innerhalb der $U_o(L)$ -Optimierung, nach einem Algorithmus des global konvergenten Innere-Punkte-Optimierungsverfahrens [ZHANG 1995] innerhalb der Matlab-Funktion „linprog“ [MATHWORKS 2015] (siehe Abschnitt 4.3.3). Kann für einen der Messpunkte ein vorgegebenes Mindest- VL im Rahmen eines Optimierungszyklus nicht erreicht werden, führt dies zum Abbruch der Optimierungsschleife für diesen Punkt. Der letzte zuvor gültige VL_1 wird gespeichert und die Optimierung befasst sich mit dem nächsten Bewertungspunkt. Konnte für einen anderen (z. B. den nächsten) Bewertungspunkt der VL_i verbessert werden, so wird der bereits als abgebrochen markierte Punkt erneut geprüft und gegebenenfalls nochmals optimiert. Auf diese Weise können Interaktionseffekte innerhalb der Optimierungen für die verschiedenen Bewertungspunkte berücksichtigt werden. Die Auflösung des Bewertungsrasters wird dabei vorgegeben. Wird der zu Beginn der Optimierung vorgegebene Mindest- VL als hartes Kriterium für einen Abbruch gesetzt, kann dies dazu führen, dass die Optimierung keine Lösung für dieses Kriterium bereitstellen kann. Die Entwicklung dieser erkennbarkeitsorientierten Optimierung erfolgt nach der Diplomarbeit von STEBLAU [2013], welche im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit betreut wurde. Sie wird nachfolgend schrittweise erläutert. Weitere Informationen zur Entwicklung und Implementierung in LiDot sind in STEBLAU [2013] ausführlich beschrieben.

4.4.1 LINEARISIERUNG DER LEUCHTDICHTEUNTERSCHIEDSSCHWELLE

Um das Verfahren der linearen Optimierung anwenden zu können, ist es notwendig, die insgesamt nicht-lineare Funktion der Leuchtdichteunterschiedsschwelle nach Kapitel 2.2.4.1 für kleine Intervalle zu linearisieren. Die Wahl der Linearisierungsmethode hängt maßgeblich von der Krümmung der zu approximierenden Funktion ab. Die konkave Funktion der Leuchtdichteunterschiedsschwelle muss zur Minimierung der Linearisierungsabweichungen mit Sekanten und mittels linearer Regression approximiert werden. Die Definition der Parameter zur Linearisierung ist mit Sorgfalt vorzunehmen, da in den ihr zugrunde liegenden Einzelfunktionen (2.18) bis (2.23) Unstetigkeiten nach Abbildung 4.1 vorliegen STEBLAU [2013]. Die Grafik zeigt als Beispiel die Approximation der Unterschiedsschwelle ΔL_s eines 60-jährigen Normalbeobachters als Funktion der adaptationsbestimmenden Umfeldleuchtdichte L_{ad} für die Sehobjektwinkel $\alpha = 4^\circ$ und $\alpha = 11^\circ$ in linearer Achsendarstellung für $0,1 \text{ cd/m}^2 \leq L_{ad} \leq 3,0 \text{ cd/m}^2$. Der konkave Verlauf der Schwellenwertfunktion lässt sich für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Sehobjekt mit $\alpha = 10^\circ$ und $\alpha = 11^\circ$ mittels linearer Regression für kleinstmögliche Approximationsabweichungen realisieren. Die Abweichungen werden in Kapitel 7 diskutiert und für verwendete Leuchtdichteniveaus in Tabelle 7.1 dargestellt [STEBLAU 2013, S. 35 f.].

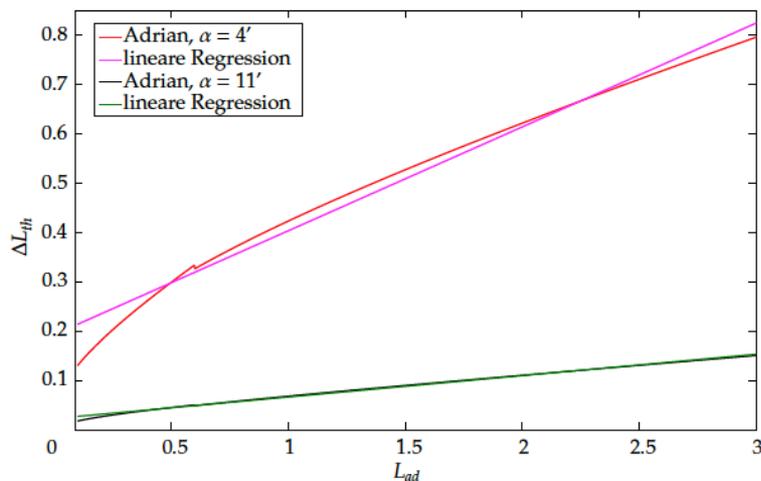


Abbildung 4.1: Linearisierung der Unterschiedsschwelle für L_{ad} im Bereich zwischen 0,1 und 3 cd/m^2 [Steb lau 2013, S. 36].

4.4.2 LINEARE OPTIMIERUNG

Unterkapitel 2.3 stellt Optimierungsverfahren thematisch angrenzender Arbeiten dar. Dabei wurde auch auf alternative Verfahren eingegangen. Ihre Vor- und Nachteile wurden bezüglich der Ansprüche an die Optimierung bereits dargelegt. Aufgrund der späteren Praxistauglichkeit ist eine entscheidende Anforderung an das Optimierungsverfahren, exakt zu wissen, dass ein Optimierungsergebnis eine bestmögliche bis „nahezu“ ideale LVK für die vorgegebene Situation bereitstellt. Im Gegensatz zur Optimierung durch Evolutionsalgorithmen oder der nicht-linearen Optimierung findet die lineare Optimierung im Falle einer Lösung immer ein globales Extremum innerhalb des definierten Suchraumes. Dies stellt sicher, dass es keine andere LVK geben kann, die wesentlich bessere Ergebnisse liefert. Nach der Linearisierung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ist es nun möglich, das Verfahren der linearen Optimierung anzuwenden. Ausführliche Erläuterungen zu dem für die Untersuchungen entwickelten Optimierungswerkzeug LiDot finden sich in der im Rahmen dieser Arbeit betreuten Diplomarbeit von STEBLAU [2013, S. 38 f.].

4.4.3 INTEGRATION DER VISIBILITY LEVEL OPTIMIERUNG

Entsprechend STEBLAU [2013, S. 41-44] ist nach Formel (2.65) aus Abschnitt 2.2.4.11 immer für jede einzelne Restriktionszeile der Restriktionsmatrix die VL -Restriktion definiert als

$$VL \leq \frac{\Delta L}{\Delta L_{th}}, \quad (4.10)$$

entsprechend der linearen Ausgangsform der Optimierung

$$VL \cdot \Delta L_{th} - \Delta L \leq 0. \quad (4.11)$$

Für das als vollkommen mit dem Leuchtdichtekoeffizienten q diffus reflektierend angenommene Sehobjekt gilt nach Gleichung (4.5) aus Kapitel 4.3.3 für die Leuchtdichte des Sehobjektes mit $L_o = q \cdot E_o$ und $\rho = q \cdot \pi \cdot \Omega_o$:

$$L_o = \frac{1}{N_o} \sum_{i=1}^N \frac{\rho_o |\sin \gamma_{o,i} \cos \beta_{o,i}|}{\pi H_i^2} I_i \quad (4.12)$$

- N = Anzahl der Lichtstrahlen der Lichtquelle
 N_o = Anzahl der Lichtstrahlen, die auf das Sehobjekt treffen
 R_i = Abstand des i-ten Messpunktes von der Lichtquelle
 ρ_o = Reflexionsgrad (des Objektes)
 I_i = Lichtstärke des i-ten betrachteten Lichtstrahles $I_i(\gamma_i; \varphi_i)$

Der Übersichtlichkeit halber wird

$$K_{o,i} = \frac{\rho |\sin \gamma_i \cos \beta_i|}{N_o \pi H_i^2} \quad (4.13)$$

eingeführt, so dass

$$L_o = \sum_{i=1}^N K_{o,i} \cdot I_i. \quad (4.14)$$

Dementsprechend wird unter den Annahmen zu Gleichung (4.5) aus Kapitel 4.3.3 diese umgeformt zu:

$$L_u = \frac{1}{N_u} \sum_{i=1}^N \frac{r_i(\gamma_i; \beta_i)}{H^2} I_i \quad (4.15)$$

- N_u = Anzahl der Strahlen, die die Leuchtdichte des Umfelds beeinflussen
 H = Lichtpunkthöhe

Auch hier kann vereinfacht formuliert werden:

$$K_{u,i} = \frac{r_i(\gamma_i; \beta_i)}{N_u H^2} \quad (4.16)$$

und

$$L_u = \sum_{i=1}^N K_{u,i} \cdot I_i. \quad (4.17)$$

Daraus folgt

$$\Delta L = \sum_{i=1}^N K_{o,i} \cdot I_i - \sum_{i=1}^N K_{u,i} \cdot I_i = \sum_{i=1}^N (K_{o,i} - K_{u,i}) \cdot I_i. \quad (4.18)$$

Unter Verwendung der in Kapitel 4.4.1 eingeführten Linearisierung kann für die Leuchtdichteunterschiedsschwelle angenommen werden:

$$\Delta L_{th} = \Delta L_{th,0} + a \cdot L_{ad} \quad (4.19)$$

- $\Delta L_{th,0}$ = Ordinatenchnitt der linearisierten Funktion ΔL_{th} für $L_{ad} = 0 \text{ cd/m}^2$

a = Steigung der linearisierten Funktion ΔL_{th}

Die mittlere Leuchtdichte wird zusammengefasst in der Form

$$\bar{L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{r_i(\gamma_i; \beta_i)}{H^2} I_i = \sum_{i=1}^N \bar{K}_i \cdot I_i. \quad (4.20)$$

Ebenso lässt sich die Schleierleuchtdichte aus der Blendbeleuchtungsstärke E_{Bl} am Beobachteraue herleiten. Für E_{Bl} gilt nach den geometrischen Beziehungen aus Abbildung 2.9 auf Seite 24:

$$E_{Bl} = \frac{\cos \theta}{R_{Bl}^2} \cdot I_{Bl} = K_{E_{Bl}} \cdot I_{Bl} \quad (4.21)$$

I_{Bl} = blendungsverursachende Lichtstärke

θ = Winkel zwischen beobachtetem Sehobjekt und blendender Störquelle in Grad

R_{Bl} = Abstand zwischen Beobachter und Blendquelle

Da die vertikale Ebene zur Bestimmung von E_{Bl} von der zur Berechnung der E_{hor} , E_{ver} und L innerhalb des Bewertungsfeldes abweicht, muss eine Interpolation mittels inverser Distanzgewichtung bei der Projektion der für das Bewertungsfeld betrachteten Lichtstrahlen I_i und der blendungsverursachenden Lichtstärken I_{Bl} vorgenommen werden. Abbildung 4.2 zeigt die zugrunde liegenden geometrischen Beziehungen. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in der Arbeit von STEBLAU [2013, S. 32 ff.].

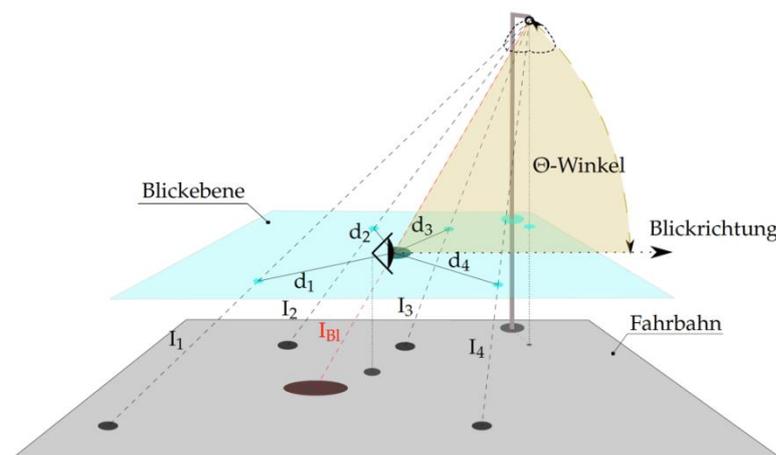


Abbildung 4.2: Geometrie zur Interpolation der blendungsrelevanten Lichtstärke [STEBLAU 2013, S. 34].

Die interpolierte Lichtstärke, welche die Blendbeleuchtungsstärke hervorruft, wird aus den Lichtstärkestrahlen der Beleuchtungsszenen mit Gleichung (4.21) wie folgt ermittelt [vgl. STEBLAU 2013, S. 34, S. 43 f.]:

$$I_{Bl} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^p} \cdot I_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^p}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^p} \cdot I_i}{S} \quad (4.22)$$

I_{Bl}	=	Interpolierte blendungsrelevante Lichtstärke nach Abbildung 4.2
I_i	=	der i -te bekannte Lichtstärkewert nach Abbildung 4.2
d_i	=	der Abstand des i -ten bekannten Wertes zum Interpolierten
p	=	Exponent zur Distanzwichtung

Die äquivalente Schleierleuchtdichte $L_{s,\ddot{a}q}$ kann nun durch Einsetzen von (4.22) und (4.21) in Gleichung (2.51) bestimmt werden:

$$L_{s,\ddot{a}q} = \frac{k \cdot K_{EBl}}{S} \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{R_i^2} = \sum_{i=1}^N K_{Bl,i} \cdot I_i \quad (4.23)$$

mit

$$k = \text{Alterskennzahl,}$$

so dass aus Gleichung (4.20) und (4.23) schließlich die Adaptationsleuchtdichte

$$L_{ad} = \sum_{i=1}^N \bar{K}_i \cdot I_i + \sum_{i=1}^N K_{Bl,i} \cdot I_i = \sum_{i=1}^N (\bar{K}_i + K_{Bl,i}) \cdot I_i \quad (4.24)$$

und die Leuchtdichteunterschiedsschwelle

$$\Delta L_s = \Delta L_{s,0} + a \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{K}_i + K_{Bl,i}) \cdot I_i \quad (4.25)$$

für die VL-Randbedingung mit der Begrenzung X_{VL}

$$\sum_{i=1}^N (K_{o,i} - K_{u,i}) \cdot I_i - VL \cdot a \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{K}_i + K_{Bl,i}) \cdot I_i \geq VL \cdot \Delta L_{s,0} \quad (4.26)$$

$$\sum_{i=1}^N [VL \cdot a \cdot (\bar{K}_i + K_{Bl,i}) + K_{u,i} - K_{o,i}] \cdot I_i \leq -VL \cdot \Delta L_{s,0} \quad (4.27)$$

zu

$$\sum_{i=1}^N K_{VL,i} \cdot I_i \leq X_{VL} \quad (4.28)$$

bestimmt werden kann.

4.5 DIFFERENZIERTE BEGRENZUNG DER SCHWELLENWERTERHÖHUNG

Zur Begrenzung der Blendung wird sowohl bei der Leuchtdichteoptimierung als auch bei der Visibility-Level-Optimierung eine Restriktion der Schwellenwerterhöhung in den eigentlichen Optimierungsvorgang implementiert. Diese wird für die VL-Optimierung in Abschnitt 4.4.3 beschrieben. Als Restriktion der Begrenzung der Schwellenwerterhöhung TI für die Leuchtdichteoptimierung wird nach Formel (2.53) in 2.2.4.1 durch Umformung in die lineare Form $A \cdot x \leq b$ definiert:

$$\left(1 - \frac{\Delta L_{\text{Bl}}}{\Delta L_{\text{oB}}}\right) \leq -TI \quad (4.29)$$

$$\Delta L_{\text{oB}}(1 + TI) - \Delta L_{\text{Bl}} \leq 0 \quad (4.30)$$

ΔL_{Bl} = Schwellenwert bei einer Adaptationsleuchtdichte $\Delta L_{\text{ad,Bl}} = \bar{L}$,

ΔL_{oB} = Schwellenwert bei einer Adaptationsleuchtdichte
 $\Delta L_{\text{ad,Bl}} = \bar{L} + L_S$.

4.6 SYSTEMIMPLEMENTIERUNG

Die Systemimplementierung der vorgestellten Optimierungen in die Programmumgebung LiDot zeigt das zugehörige Flussdiagramm (Abbildung 4.3). Das Ergebnis des Vorgangs ist ein Lichtstärkeverteilungskörper, der unter der gewählten Optimierungsart und den lichttechnischen sowie geometrischen Rahmenbedingungen die bestmöglichen Sichtverhältnisse entsprechend dem jeweiligen Optimierungsziel bereitstellt. Der strukturelle Aufbau von LiDot und eine ausführliche Klassen- und Programmstruktur sind in [STEBLAU 2013, S. 46-52] angeführt.

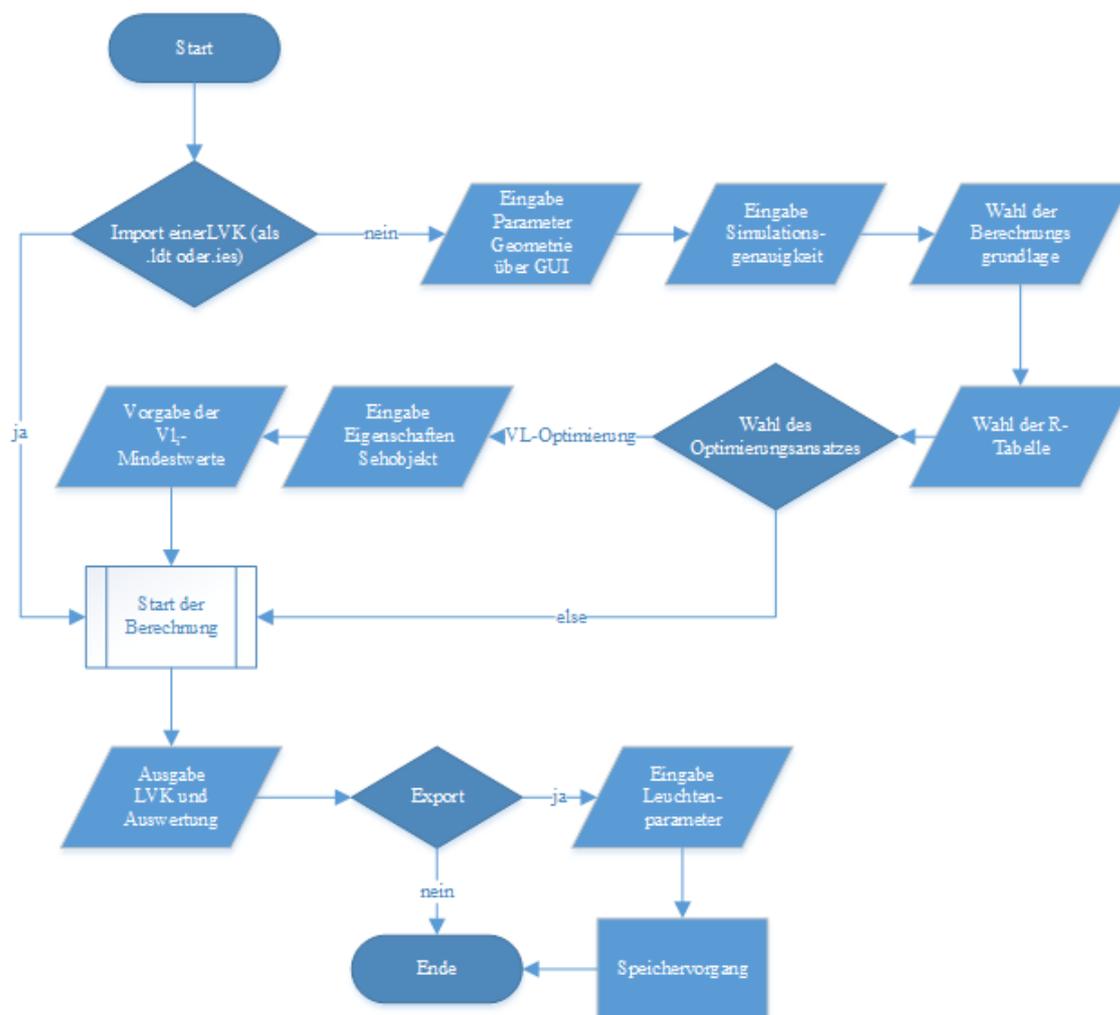


Abbildung 4.3: Schematisches Flussdiagramm des LiDot Frameworks nach STEBLAU [2013, S. 48].

Für jede zu untersuchende Beleuchtungsinstallation wird eine virtuelle Beleuchtungsszene generiert. Die Umsetzung erfolgt mittels der Raytracing-Software Radiance [FULLER & MCNEIL 2013] in Matlab[®], Version 2010b [THE MATHWORKS INC. 2014]. Voruntersuchungen im Rahmen der Arbeit [BREMER 2012; LE 2012; YAHYAOU 2012; FRANKE 2012] zeigten, dass sich Radiance sowohl hinsichtlich der Flexibilität der Anwendung wie auch der Präzision der Raytracingergebnisse besser eignet als andere Lichtplanungsprogramme wie DIALux[®] oder Relux[®]. In der Kombination aus Matlab[®] und Radiance übernimmt Matlab[®] die Konfiguration der Szenen für die Radiance Simulation, ebenso wie die Berechnung und Auswertung der lichttechnischen Gütekennzahlen. Radiance konfektioniert die Beleuchtungsszene und führt das eigentliche Raytracing durch. Abbildung 4.4 gibt eine Übersicht über die Prozesse und Interaktionen der Software. Die entsprechenden Frameworks erfolgten in den Arbeiten FRANKE [2012] und YAHYAOU [2012].

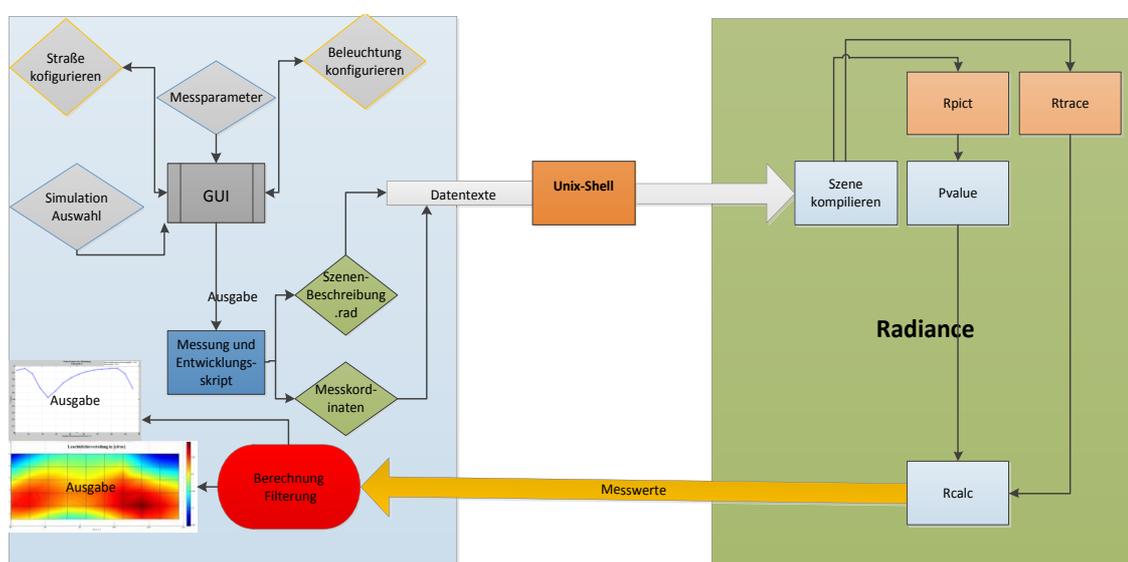


Abbildung 4.4: Simulationsprozesse und Verknüpfung von Radiance und Matlab[®] [YAHYAOU 2012].

Die für die Erstellung einer Beleuchtungsszene benötigten Eingangsparameter werden entweder direkt in Matlab[®] oder mittels eines Matlab[®] Nutzerinterfaces (GUI¹⁴) eingegeben. Die den Leuchten der Szene zuzuordnenden LVK-Daten werden auf Basis des „ies“-Formates importiert und mittels des Konvertierungsprogrammes „ies2rad“ in Rad-Dateien umgewandelt. Das Programm erstellt daraufhin eine Szenenbeschreibung für Radiance. Die Beleuchtungsszene geht grundsätzlich von einem geraden Straßenverlauf ohne Kreuzungen oder Einmündungen aus. Zwar sind die Straßenprofile „Allgemeiner Verkehrsweg“, „Straße ohne Mittelstreifen“ sowie „Straße mit Mittelstreifen“ entsprechend der Visualisierung in Abbildung 4.5 hinterlegt, sollen im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht gesondert betrachtet werden. Die auf diese Weise erzeugten virtuellen Straßenbeleuchtungsszenen werden mit oder ohne Sehobjekt in Form eines virtuellen Leuchtdichtebildes (Abbildung 4.6, links) ausgegeben.

¹⁴ GUI: Graphical User Interface, grafische Benutzeroberfläche.

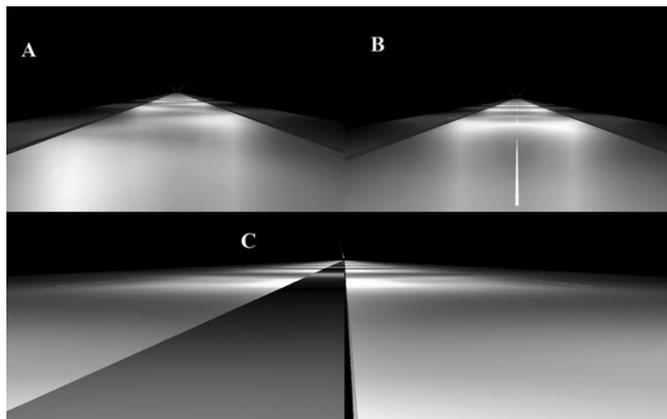


Abbildung 4.5: Allgemeiner Verkehrsweg (A), Straße ohne Mittelstreifen (B), Straße mit Mittelstreifen (C) [YAHYAQUI 2012].



Abbildung 4.6: Vergleich von simuliertem (links) und realem Leuchtdichtebild (rechts) anhand einer in der Simulation nachgestellten realen Beleuchtungsszene.

Die Auswertung eines mit Radiance erzeugten Leuchtdichtebildes erfolgt, zur Wahrung der Vergleichbarkeit zu anderen Arbeiten, angelehnt an die Bewertungsmethoden für ortsfeste Straßenbeleuchtung der DIN EN 13201 und dem ANSI / IESNA Standard RP-8-00. Diese beinhalten die Erfassung der horizontalen Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten im Messfeld nach Kapitel 3.2 sowie deren beider Gesamt- und Längsgleichmäßigkeiten. Die Auflösung des Messrasters orientiert sich dabei wahlweise an den Vorgaben zum Messraster nach [IESNA 2005; DIN 2007D; CIE 2010A] oder hochauflösend (mit entsprechend höherer Berechnungszeit). Obwohl die optimierten LVK von einer Symmetrie längs der Fahrbahn ausgehen, blickt der Beobachter bei der Leuchtdichtebewertung immer aus der Fahrtrichtung auf das Messfeld. Die Gütekennzahlen zur Bewertung der Beleuchtung werden aus den Verteilungen und den generierten Leuchtdichtebildern ermittelt und in einzelnen Datensätzen weiterverarbeitet.

5

AUSWIRKUNGEN UNTERSCHIEDLICH OPTIMIERTER LICHTVERTEILUNGEN

Entsprechend den Ausprägungen der unabhängigen Variablen nach Kapitel 3.4 wurden 54 Beleuchtungsinstallationen für die Optimierung auf eine maximal mögliche Gesamtgleichmäßigkeit der horizontalen und vertikalen Beleuchtungsstärke sowie der Leuchtdichte untersucht. Die Parametervariation umfasst jeweils drei Ausprägungen des relativen Mastabstandes bei je sechs unterschiedlichen Fahrbahndeckschichten (C1, C2, R1, R2, R3, R4).

Die Bewertung der Erkennbarkeiten erfolgte nach der in Abschnitt 2.1.3 definierten stationären Beobachtung. Für die in der Praxis häufig vorkommenden Fahrbahndeckschichten R2 und R3 wurde zusätzlich die dynamische Beobachtung herangezogen. Vorversuche dieser Arbeit [LU 2013; BREMER 2012; LE 2012] zeigten, dass die $|VL|_i$ -Verläufe unter anderem aufgrund der Verringerung des Sehobjekt-Sehwinkels mit zunehmender Objektentfernung unter stationärer Beobachtung niedriger ausfallen als unter dynamischer Beobachtung. Beide Beobachtungsformen werden detailliert in Kapitel 2.1.3 beschrieben.

Die direkte Optimierung der Lichtstärkeverteilungskörper auf die Visibility-Level-Verläufe wurde ebenfalls explizit für die Deckschichten R2 und R3 bei stationärer Beobachtung durchgeführt. Die Bewertung der resultierenden sechs Beleuchtungsinstallationen erfolgte als Vergleich von stationärer und dynamischer Beobachtungsform für alle vier Optimierungsansätze.

5.1 KONVENTIONEN

Der Übersicht und Verständlichkeit halber ist in den folgenden Kapiteln, die sich mit der Auswertung der Erkennbarkeiten befassen, streng zu unterscheiden nach:

1. *Positive und negative VL-Werte:* VL-Werte können negative (Negativkontrast) oder positive (Positivkontrast) Werte annehmen. Dies hat jedoch nichts mit der Qualität der Erkennbarkeit zu tun. Nimmt ein negativer Wert zu, nähert er sich dem Nulldurchgang und führt somit zu einem schlechteren VL. Nimmt ein positiver Wert zu, verbessert sich dementsprechend das Visibility Level. „Vergrößern“ und „verkleinern“ bezieht sich im Kontext dieser Arbeit also nur auf die Lage des VL-Wertes, nicht aber auf die Qualität des Visibility Level.
2. *Bessere und schlechtere VL-Werte:* Die Qualität der VL lässt sich somit viel eher über den Betrag des jeweiligen VL-Wertes kennzeichnen. Je größer der Betrag, desto besser die Erkennbarkeit anhand des Visibility Level.

Wird also im Folgenden über „positiv (oder auch höher)“ und „negativ (oder auch niedriger)“ argumentiert, wird Bezug auf den mathematischen Wert genommen. Geht es um „gut“ und „schlecht“, bezieht sich die Aussage auf die Qualität des VL , außer es wird eindeutig über $|VL|$ argumentiert. Die Kontrastpolarität wird durch den Kontrastpolaritätsfaktor F_{CP} berücksichtigt.

Als kritische VL -Werte werden in Anlehnung an die Kapitel 2.2.4.11 und 2.3 Werte bezeichnet, die in dem Bereich $|VL| < 1$ liegen. In diesem Bereich wird nach aktuellem Stand der Forschung davon ausgegangen, dass einfache Sehobjekte nicht erkannt werden.

Die Verteilung der VL -Werte wird zu Zwecken der Übersichtlichkeit sowohl als Verlauf, als auch als Boxplot-Darstellung visualisiert. Die Abbildungen in diesem Kapitel dienen als repräsentative Beispiele und sind lediglich ein Auszug der Gesamtergebnisse. Die vollständige Auflistung aller Ergebnisgrafiken und Übersichtstabellen sind dem Anhang A.5 zu entnehmen.

5.2 GLEICHMÄßIGKEITSORIENTIERTE OPTIMIERUNGEN

5.2.1 REALISIERTE LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKÖRPER

Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht über die für die Untersuchungen des Kriteriums Maximierung der Gleichmäßigkeit berechneten Lichtstärkeverteilungskörper. Der blaue Volumenschnitt repräsentiert die C0-C180-Ebene der LVK, der rote Schnitt die C90-C270-Ebene. Das Koordinatensystem ist in ein 30° -Schritte unterteilt. Alle Verteilungen sind entlang der C0-C180-Ebene symmetrisch. Die Darstellung der LVK ist der Übersichtlichkeit halber zueinander relativ und nicht auf gleiche Skalierung normiert.

Da die Eigenschaften der Deckschicht für eine gleichmäßige Verteilung der Beleuchtungsstärke nicht relevant sind, entspricht hier die Anzahl der LVK dem Variationsumfang des relativen Mastabstandes S_{rel} . Abbildung 5.1 zeigt die LVK der $U_o(E_{hor})$ -Optimierung, Abbildung 5.2 die der $U_o(E_{ver})$ -Optimierung. Maßgeblich für diese LVK-Typen sind die Winkel- und Entfernungsbeziehungen zwischen Lichtquelle und Messfläche.

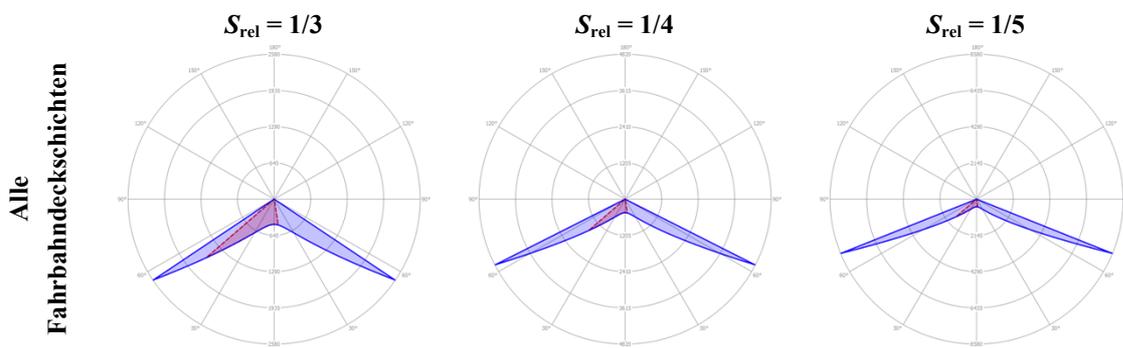


Abbildung 5.1: LVK für gleichmäßige Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke bei relativem Mastabstand S_{rel} , $U_o, E_{hor} = 1,00$, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30° -Schritten, relative Darstellung.

Die verglichen zu den $U_o(E_{hor})$ -LVK flacheren Hauptabstrahlwinkel der $U_o(E_{ver})$ -LVK resultieren aus der Konvention, dass die Reichweite der $U_o(E_{hor})$ -LVK auf den halben Mastabstand begrenzt ist. Die Berechnung der $U_o(L)$ -optimierten LVK erfolgt entsprechend der Charakte-

ristik der Fahrbahndeckschicht. Abbildung 5.3 führt daher die $U_o(L)$ -LVK für die C-Tabellen, Abbildung 5.4 die für die R-Tabellen zu den untersuchten relativen Mastabständen S_{rel} auf. Der Einfluss der Interpolation von Werten der C- und R-Tabellen wird im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtung in Kapitel 7.1 diskutiert. Im Gegensatz zu den flachen Hauptausstrahlrichtungen der $U_o(E)$ -LVK, weisen die $U_o(L)$ -LVK mit steigender Spekularität der Deckschicht verstärkt Komponenten steiler Abstrahlwinkel auf, die LVK werden „bauchiger“. Der Vergleich von Abbildung 5.1 mit den Abbildungen 5.2 bis 5.4 zeigt, dass die Begrenzung des γ -Winkels für die $U_o(E_{hor})$ -Optimierung restriktiver gegen flache Abstrahlwinkel greift als die TI -Begrenzung bei den $U_o(L)$ -LVK.

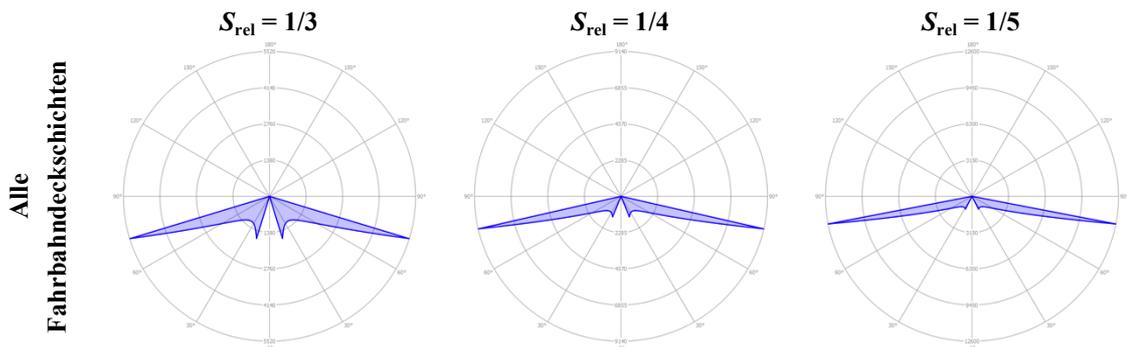


Abbildung 5.2: LVK für gleichmäßige Verteilung der vertikalen Beleuchtungsstärke, $U_{o, Ever} = 1,00$, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, γ in 30° -Schritten, relative Darstellung.

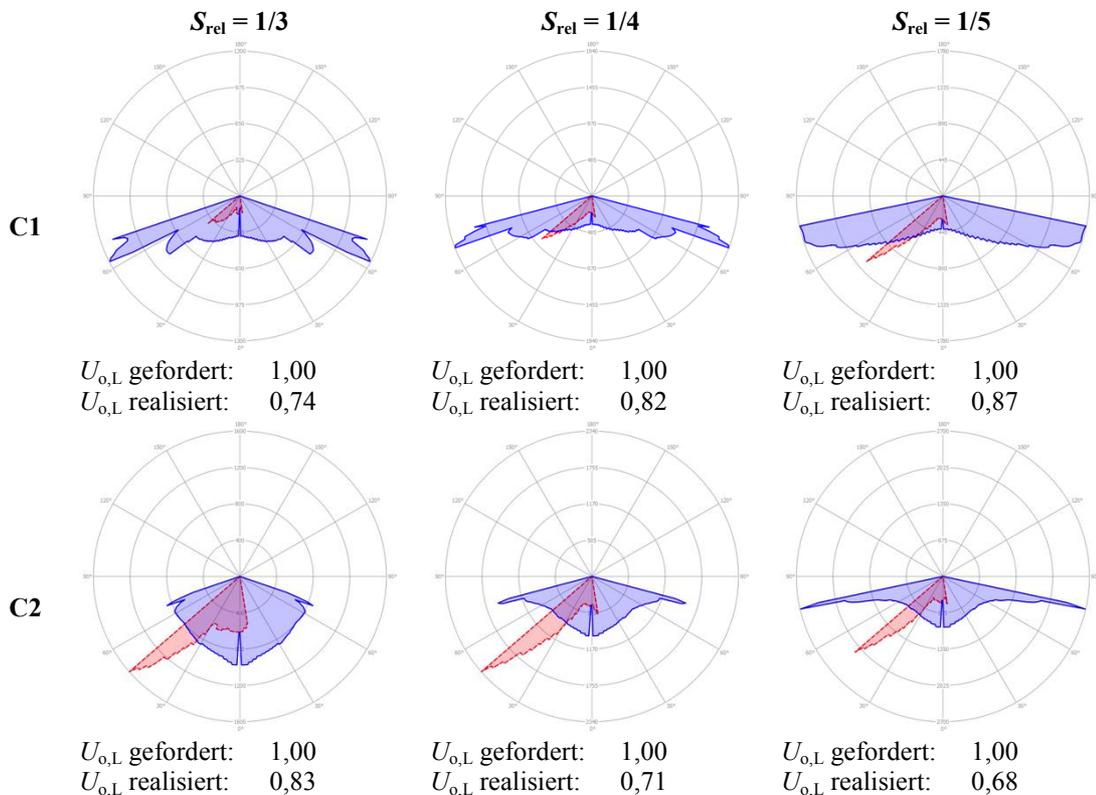


Abbildung 5.3: LVK der Optimierung auf uniforme Leuchtdichteverteilung, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30° -Schritten, relative Darstellung, erster Teil.

Aufgrund der Begrenzung der Schwellenwerterhöhung TI für die Leuchtdichteoptimierung lassen sich nur LVK bestmöglicher Gesamtgleichmäßigkeit „ $U_{o,L}$ realisiert“ erreichen.

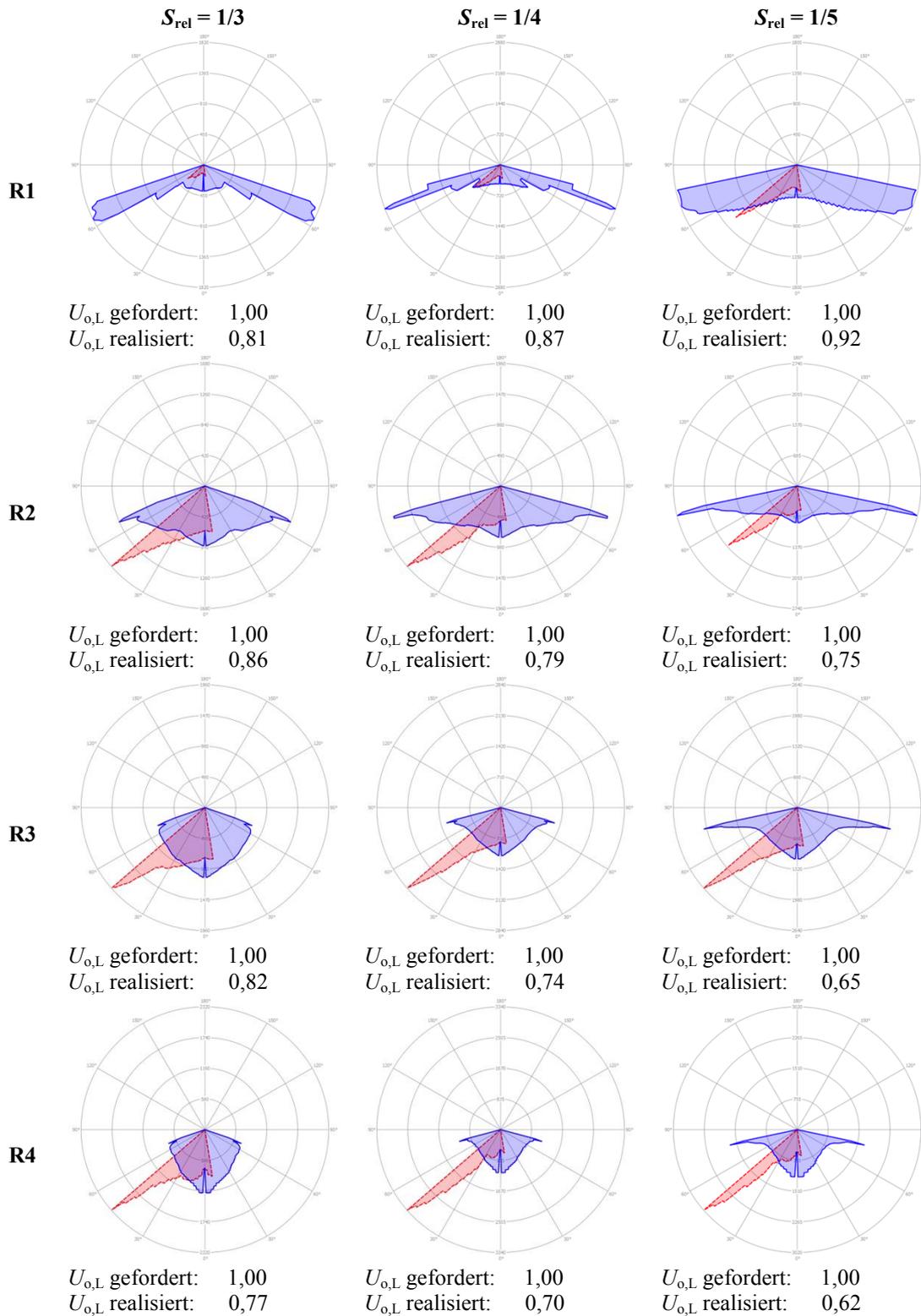


Abbildung 5.4: Realisierte Lichtstärkeverteilungskörper für die Optimierung auf eine uniforme Leuchtdichtevertelung bei relativem Mastabstand S_{rel} , geforderte und erzielte Gesamtgleichmäßigkeiten, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30°-Schritten, relative Darstellung, zweiter Teil.

5.2.2 RESULTIERENDE LICHTVERTEILUNGEN AUF DER FAHRBAHN

Die folgenden Beleuchtungsniveaus und Gleichmäßigkeiten resultieren aus der Anwendung der in Abschnitt 5.3.1 vorgestellten LVK. Abbildung 5.5 führt die erzielten mittleren Leuchtdichten und mittleren horizontalen Beleuchtungsstärken der drei gleichmäßigkeitsorientierten Optimierungen auf.

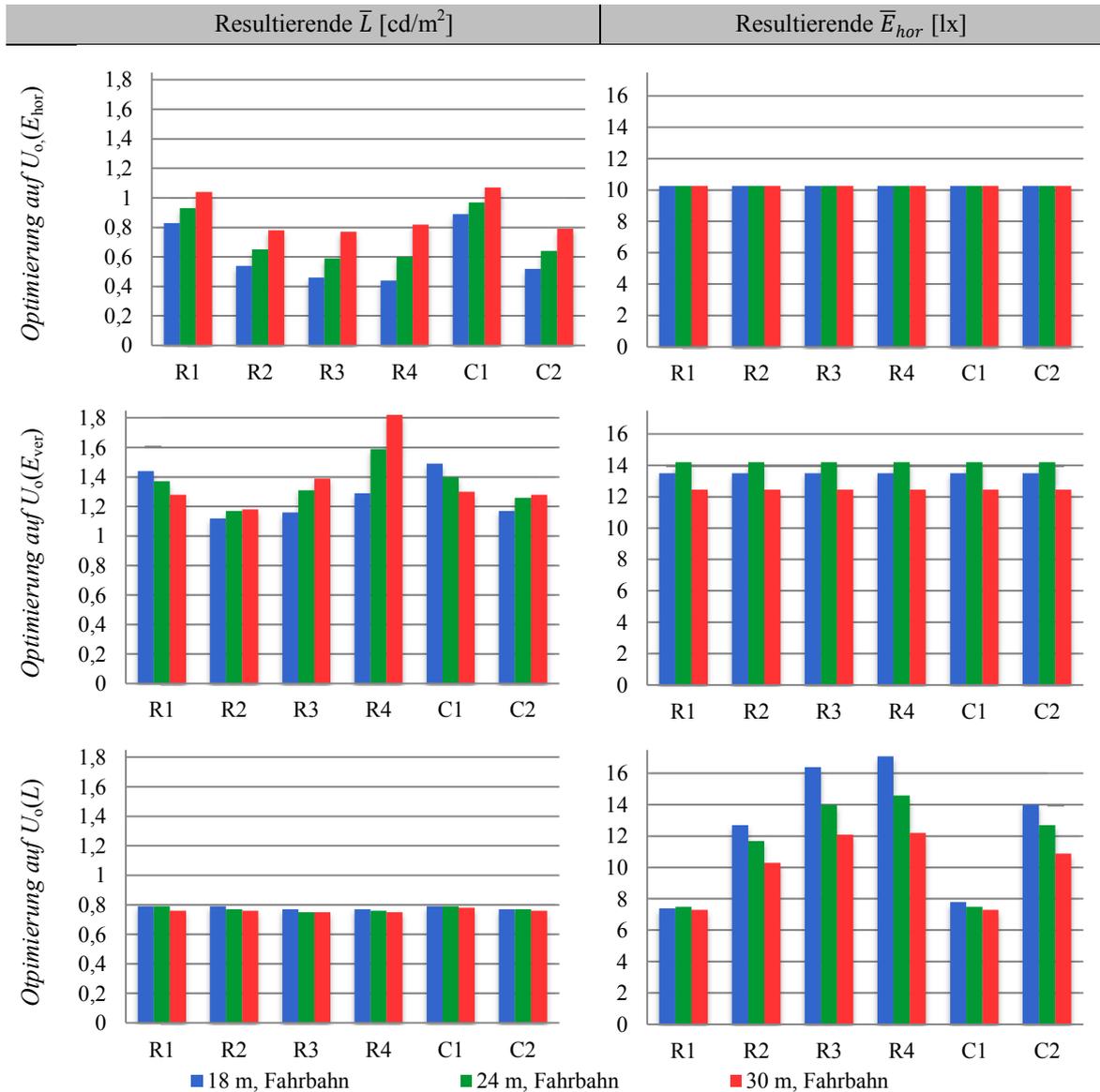


Abbildung 5.5: Erzielte mittlere Leuchtdichten und Beleuchtungsstärkeniveaus.

Nach Tabelle 3.2 auf Seite 42 ist als angestrebtes Mindestbeleuchtungsniveau der horizontalen Beleuchtungsstärke 10 lx definiert. Für die Optimierung auf $U_o(L)$ sind $0,75 \text{ cd}/\text{m}^2$ vorgegeben. Die erzielten Werte nach Abbildung 5.5 zeigen, dass die Leuchtdichteoptimierung die Vorgaben nicht so exakt erfüllen kann wie die $U_o(E_{hor})$ -Optimierung. Weiter ist ersichtlich, dass die $U_o(L)$ -Optimierung ebenso wenig die Mindestanforderung an das Beleuchtungsstärkeniveau nach Tabelle 3.2 erfüllt wie $U_o(E_{hor})$ -Optimierung das Mindestleuchtdichteniveau. Erfüllt also eine auf Leuchtdichte optimierte Beleuchtungsinstallation ihre Anforderungen an das Beleuchtungsniveau, bedeutet dies nicht zwangsläufig, dass sie die Anforderungen an das Niveau der äquivalenten Beleuchtungsstärkeklasse erfüllt und umgekehrt. Abbildung 5.6 zeigt die erzielten

Gesamtgleichmäßigkeiten von Leuchtdichte und horizontaler Beleuchtungsstärke. Deutlich erkennbar ist, dass die jeweilige Bewertung hier die besten Ergebnisse für das ihr selbst zugrunde liegende Optimierungsverfahren erzielt.

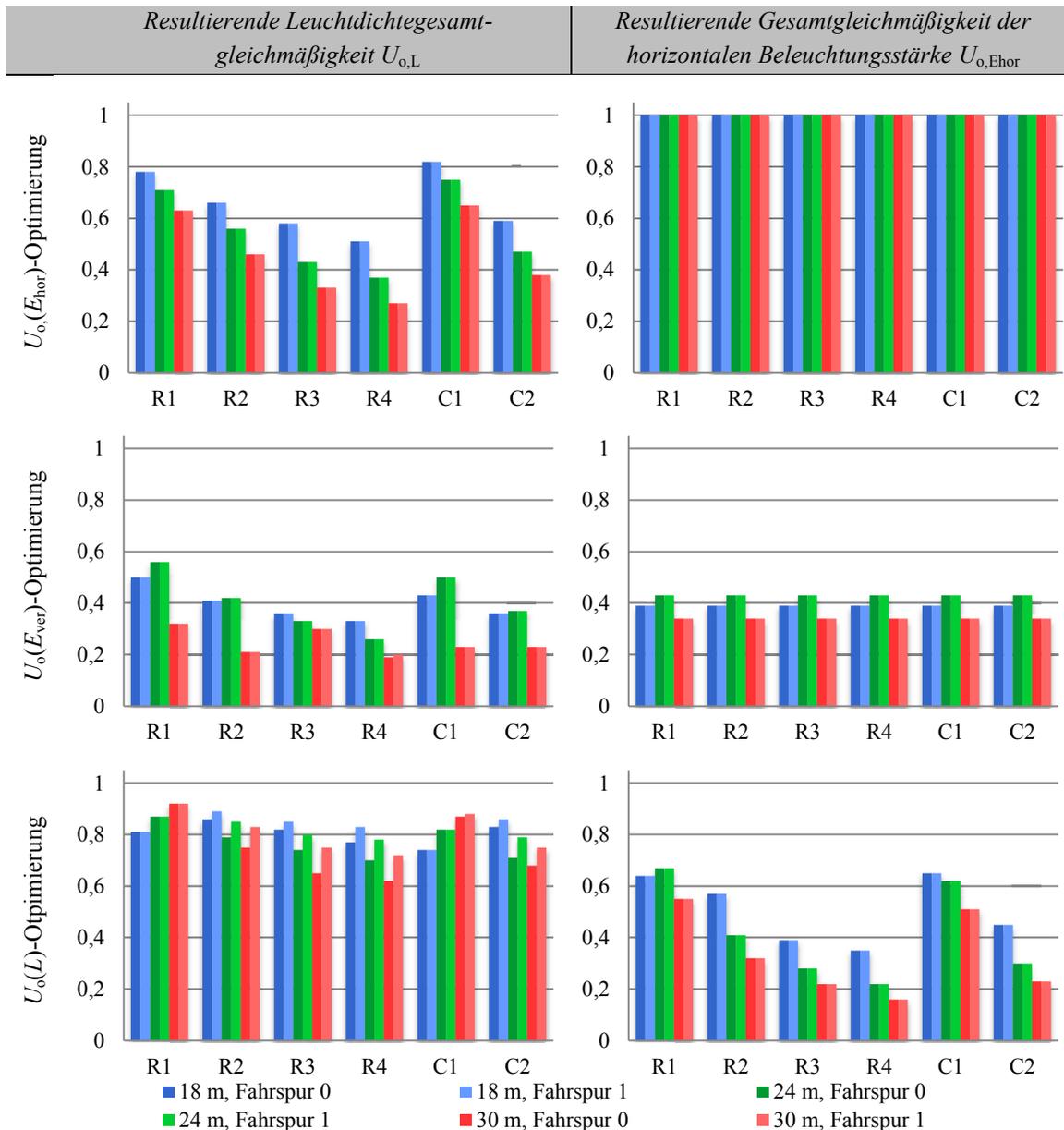


Abbildung 5.6: Erzielte Gesamtgleichmäßigkeiten der drei gleichmäßigkeitsorientierten Optimierungen.

Bei den Gesamtgleichmäßigkeiten zeigt sich, dass eine auf Leuchtdichte optimierte Beleuchtungsinstallation die Anforderungen an das U_o der äquivalenten Beleuchtungsstärkeklasse nicht zwangsläufig erfüllt, wenn sie ihre eigenen Mindestanforderungen an eine Gesamtgleichmäßigkeit von 0,4 weit übertrifft und umgekehrt.

5.2.3 RESULTIERENDE ERKENNBARKEITEN, STATIONÄRE BEOBACHTUNG

5.2.3.1 EINFLUSS SEHOBJEKTRERFLEXIONSGRAD

Abbildung 5.7 zeigt die in den Simulationen erzielten typischen VL -Verläufe bei vollkommen gleichmäßiger Verteilung von E_{hor} . In allen untersuchten Beleuchtungsszenen teilt sich der VL -Verlauf der $U_0(E_{\text{hor}})$ -Optimierung charakteristisch zur Hälfte längs des Bewertungsfeldes. Die VL -Werte der dem ersten Lichtpunkt 1 zugewandten Hälfte hängen stark vom Reflexionsgrad des Sehobjektes ab. Der weitere VL -Verlauf in der Lichtpunkt 2 zugewandten Hälfte ist mit $|VL|_i > 4,7$ dagegen kaum anfällig für eine Änderung des Sehobjektreflexionsgrades.

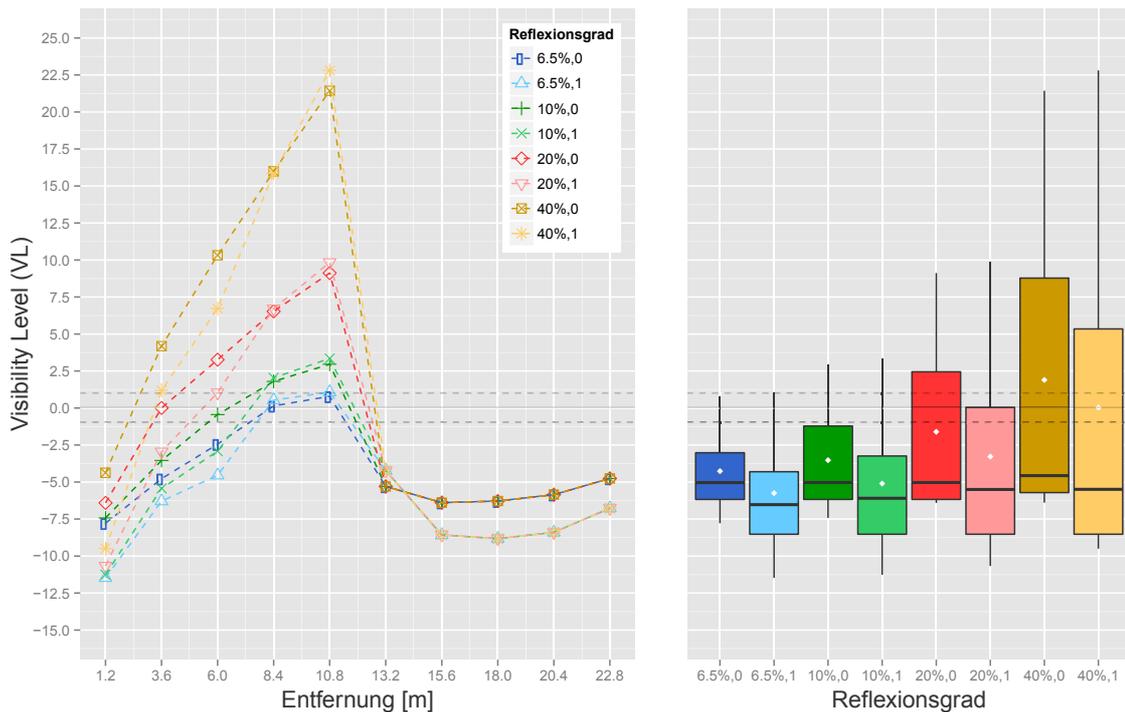


Abbildung 5.7: Typischer VL -Verlauf bei gleichmäßiger E_{hor} . Mastabstand 24 m, Lichtpunkthöhe 6 m, R3, stationärer Beobachter, den Leuchten zugewandte Fahrspur 1 und abgewandte Fahrspur 0, links VL -Verlauf entlang des Messfeldes. Die Entfernung des jeweiligen Messpunktes bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes auf Höhe der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert der Bereich $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der links angeführten VL -Verläufe, Box der zwei inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (schwarzer Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

Dagegen nimmt die Schwankung der VL -Werte der ersten Hälfte mit steigendem Reflexionsgrad stark zu und strebt zu höheren VL , während die übrigen konstant negativ bleiben. Bereits bei einem Reflexionsgrad ab 10 % führt dies bei der $U_0(E_{\text{hor}})$ -Optimierung zu einer Kontrastumkehr. Ein gewünschter Verlauf, in welchem das Visibility Level nicht unter $|VL| = 1$ sinkt, wird bei keinem der berücksichtigten Reflexionsgrade erzielt. Die starke Schwankung der VL -Werte verursacht bei $\rho_0 = 40\%$ VL -Bereiche zwischen < -6 und > 21 . Der Median schwankt mit $\Delta VL_{\text{med, Ehor}}(6,5\%; 40\%; S_0) = 1,91$ bis $\Delta VL_{\text{med, Ehor}}(6,5\%; 40\%; S_1) = 0,71$, unabhängig von der Fahrspur kaum. Der Mittelwert variiert von $\Delta \overline{VL}_{\text{Ehor}}(6,5\%; 40\%; S_0) = 6,24$ bis $\Delta \overline{VL}_{\text{Ehor}}(6,5\%; 40\%; S_1) = 6,33$. Dieser Effekt resultiert aus dem Prinzip der Fahrbahnausleuchtung der $U_0(E_{\text{hor}})$ -Optimierung. Eine Übersicht findet sich in Anhang A.5.1.

Entsprechend Abbildung 5.8 beleuchtet jede Leuchte aus Gründen der Blendungsbegrenzung und der Lichtstromminimierung nur die ihr nähergelegene Hälfte des Bewertungsfeldes. Dies führt dazu, dass die Sehobjekte in der ersten Hälfte eher beleuchtet und in der zweiten hauptsächlich hinterleuchtet werden. Da die Leuchtdichte des Sehobjektes bei der Hinterleuchtung weitgehend unabhängig von dessen Reflexionsgrad ist, bleiben die VL -Werte hier nahezu unverändert¹⁵. Weniger streuende VL -Werte lassen sich mit der Optimierung auf eine homogene Verteilung von E_{ver} erzielen. Abbildung 5.9 zeigt den charakteristischen Verlauf der VL -Werte bei einer $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung. Die für die $U_o(E_{\text{hor}})$ -Optimierung charakteristischen Schwankungen finden sich hier nicht wieder.

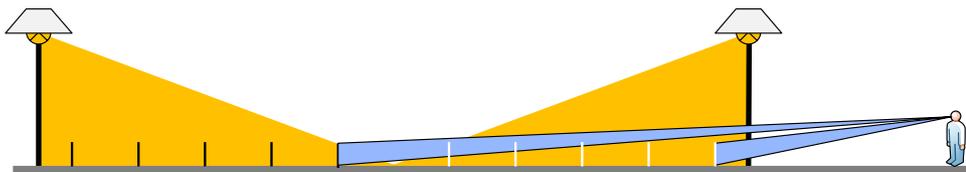


Abbildung 5.8: Ausleuchtung der Fahrbahn bei $U_o(E_{\text{hor}})$ -Optimierung. Konzeptbedingtes Mitstrahlprinzip in der ersten Hälfte und Gegenstrahlprinzip in der zweiten Hälfte des Bewertungsfeldes.

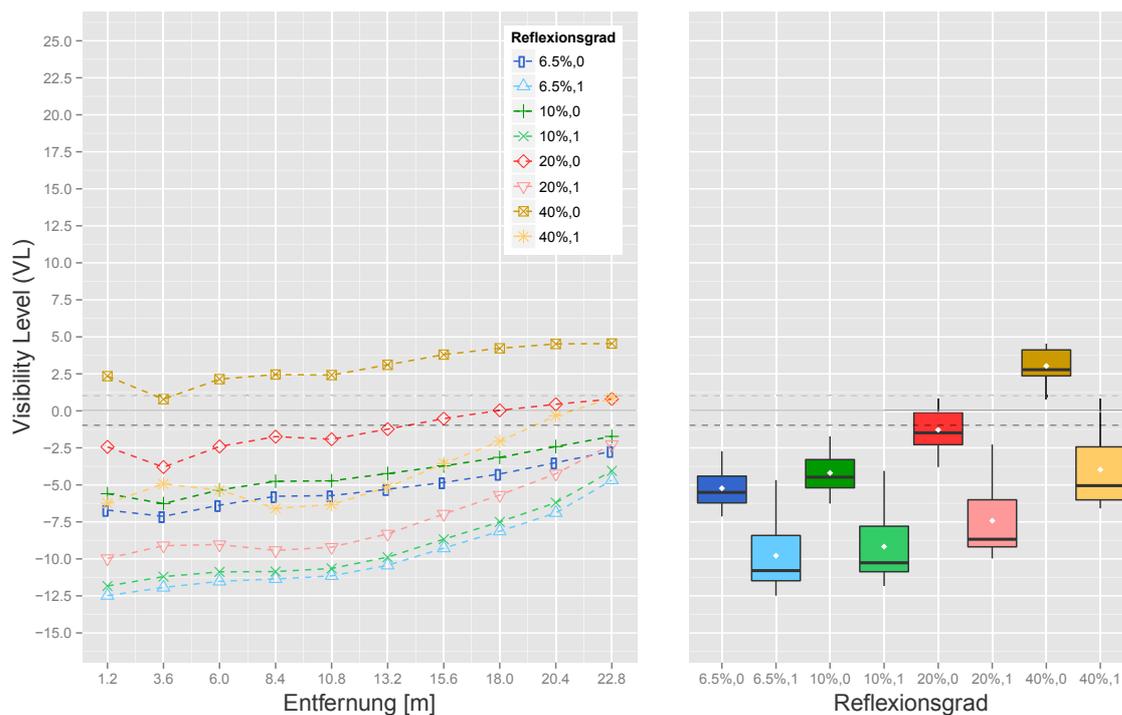


Abbildung 5.9: Typischer VL -Verlauf E_{ver} -optimierter Lichtverteilungen. Beispielsituation: Mastabstand 24 m, Masthöhe 6 m, Deckschicht R3, stationärer Beobachter, links VL -Verlauf entlang des Messfeldes. Die Entfernung des jeweiligen Messpunktes bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes auf Höhe der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert der Bereich $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der links angeführten VL -Verläufe, Box der zwei inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (schwarzer Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

¹⁵ Es sei an dieser Stelle jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass im Rahmen dieser Arbeit keine Rückwärtsreflexionen durch die Fahrbahn bei Objekthinterleuchtung berücksichtigt sind. Diese können nach [ADRIAN & GIBBONS 1993; ADRIAN ET AL. 1993] einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Erkennbarkeit von Objekten haben. Ausführliche Beschreibungen dieses Einflusses liegen jedoch zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht vor.

Auch hier nehmen die Verläufe auf beiden Fahrspuren mit steigendem Sehobjektreflexionsgrad zu, auf der den Leuchten abgewandten Fahrspur S_0 stärker als auf der zugewandten S_1 : $\Delta VL_{\text{med,Ever}}(6,5\%; 40\%; S_0) = 8,29$ zu $\Delta VL_{\text{med,Ever}}(6,5\%; 40\%; S_1) = 6,91$ sowie $\Delta \overline{VL}_{\text{Ever}}(6,5\%; 40\%; S_0) = 10,49$ zu $\Delta \overline{VL}_{\text{Ever}}(6,5\%; 40\%; S_1) = 6,87$.

Während aufgrund der stark schwankenden Verläufe bei der $U_0(E_{\text{hor}})$ -Optimierung kurze Durchgänge durch den Bereich $|VL| \leq 1$ zu kleinen Bereichen schlechter Erkennbarkeit führen, kommt es bei der $U_0(E_{\text{ver}})$ -Optimierung ab $\rho_0 = 20\%$ aufgrund der niedrigeren Schwankungsbreite des Verlaufes häufig zu ausgedehnten Bereichen schlechter Erkennbarkeit, obwohl die Ergebnisse für die untersuchten Sehobjekte mit $\rho_0 \leq 10\%$ wesentlich besser ausfallen. Dies führt dazu, dass bei einem Sehobjektreflexionsgrad von $\rho_0 = 20\%$ in 6 von 18 untersuchten Situationen weiträumige Bereiche schlechtere Erkennbarkeiten auftreten (siehe auch Anhang A.5.2), was sich auf die Mittelwerte der VL_i auswirkt. Sie sind in Abbildung 5.11 für die vertikale Beleuchtungsstärke der stationär beobachteten Situationen dargestellt. Die Ergebnisse der VL -Kennzahlen der $U_0(L)$ -Optimierung, in Abbildung 5.11 anhand des \overline{VL} illustriert, ähneln denen der $U_0(E_{\text{ver}})$ -Optimierung (vgl. auch Übersichten A.5.2 und A.5.3), obwohl der charakteristische VL -Verlauf, wie in Abbildung 5.10 dargestellt, abweicht.

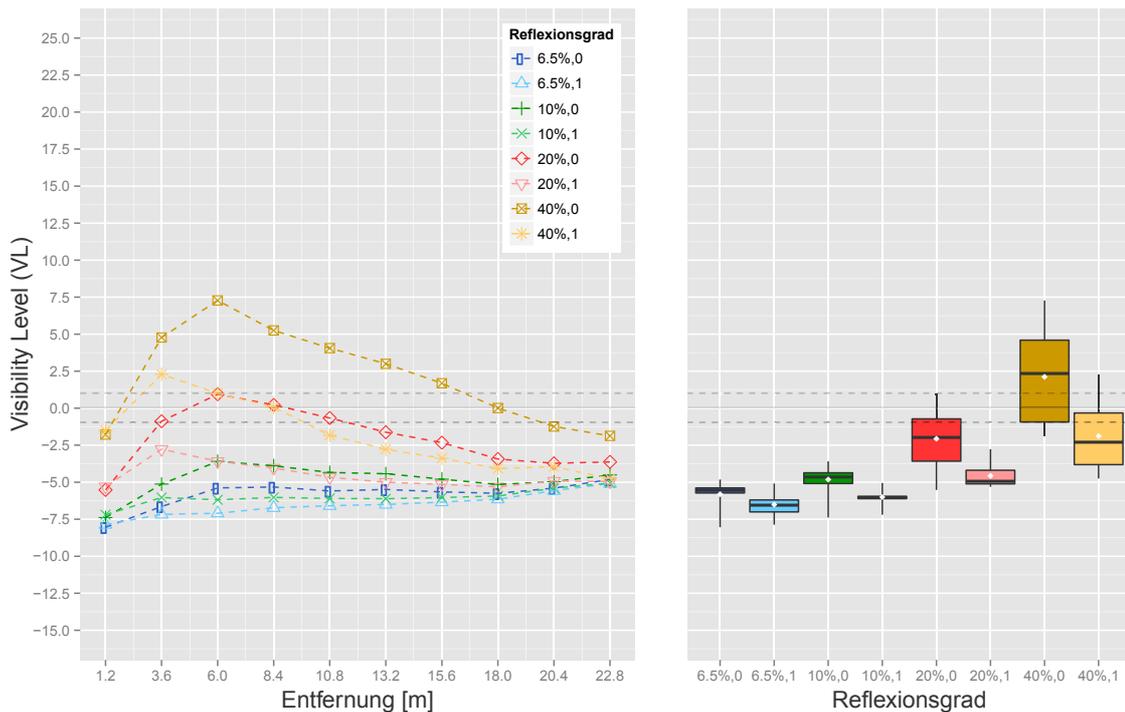


Abbildung 5.10: Typischer VL -Verlauf der Optimierung auf die Leuchtdichtegleichmäßigkeit. Beispiel-situation: Mastabstand 24 m, Lichtpunkthöhe 6 m, Deckschicht R 3, stationärer Beobachter, links VL -Verlauf entlang des Messfeldes, die Entfernung des jeweiligen Messpunktes bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes auf Höhe der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert der Bereich $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der links angeführten VL -Verläufe, Box der zwei inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (schwarzer Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

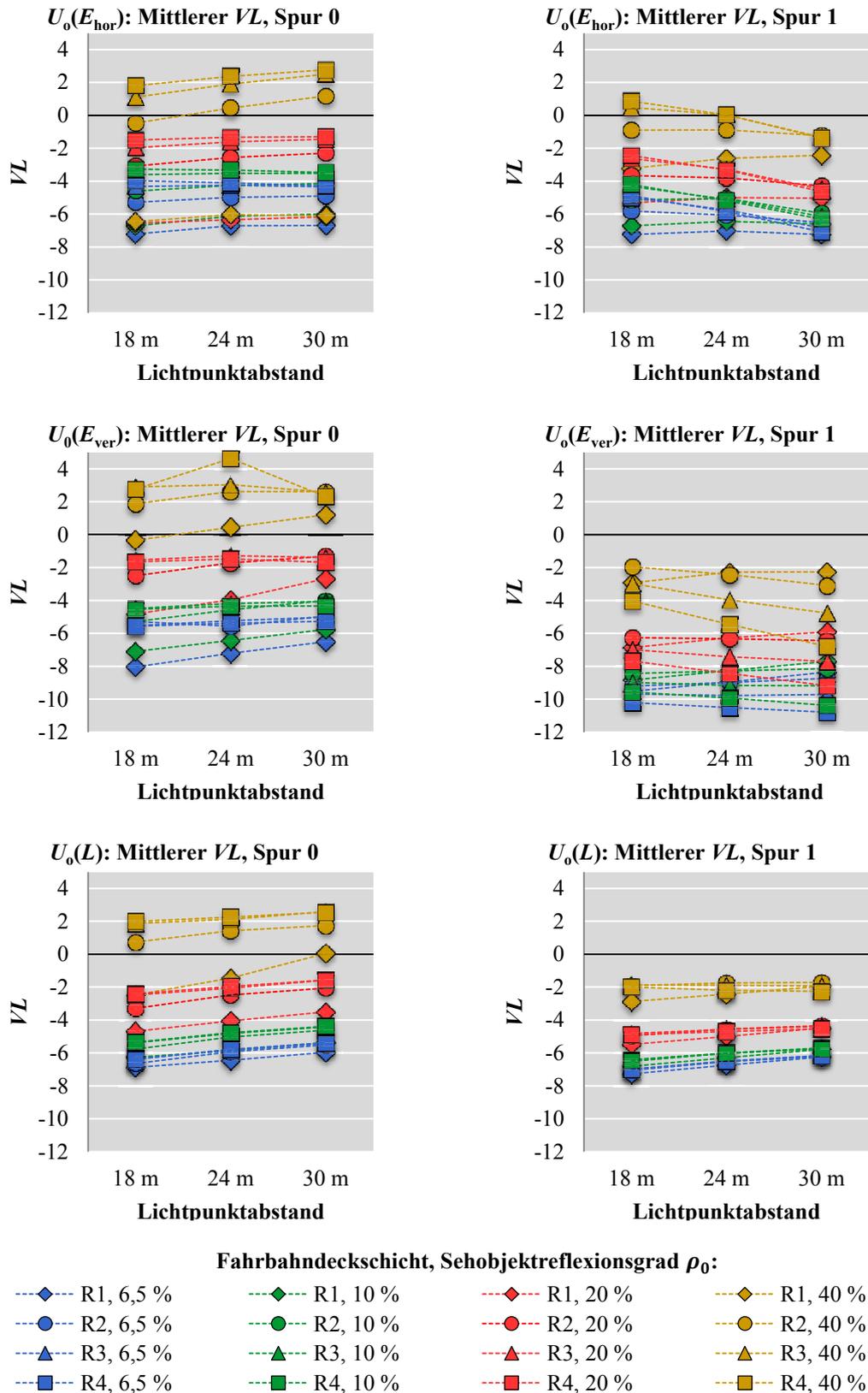


Abbildung 5.11: Mittlere VL-Werte, erzielt mit $U_0(E_{\text{ver}})$ - und $U_0(L)$ - Optimierung abhängig von Schobjektreflexionsgrad, Fahrbahndeckschicht und Lichtpunktabstand.

Auch hier steigen die VL -Werte mit steigendem Reflexionsgrad. Dies führt dazu, dass auf der den Lichtpunkten abgewandten S_0 ab $\rho_o = 20\%$, abhängig von der gewählten Beleuchtungsszene, Bereiche schlechter Erkennbarkeit auftreten. Auf der zugewandten S_1 treten für typische Sehobjekte keine Bereiche kritischer Erkennbarkeit auf. Bei kritischen Sehobjekten führt die Leuchtdichteoptimierung ebenso wie die $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung zu allmählichem Durchlaufen des $|VL| < 1$ -Intervalls. Dies führt zu weiten Bereichen schlechter Erkennbarkeiten.

Insgesamt werden in nur 9 von 48 stationär betrachteten Beleuchtungsszenen der U_o -Optimierungen für das $\rho_o = 20\%$ -Objekt durchgehend $|VL|_i \geq 1$ erzielt. Entsprechend dem Silhouette-Prinzip nehmen die $|VL|_i$ bei $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung und $U_o(L)$ -Optimierung mit sinkendem ρ_o zu, so dass $\rho_o = 10\%$ und $\rho_o = 6,5\%$ durchgehend $|VL|_i \geq 1$ aufweisen. In den stationär beobachteten Szenen bewirken alle gleichmäßigkeitsorientierten Optimierungen für das $\rho_o = 40\%$ -Sehobjekt Kontrastumkehrungen und damit verbundene kritische Erkennbarkeiten.

5.2.3.2 EINFLUSS FAHRBAHNDECKSCHICHT

Der Einfluss der Fahrbahndeckschicht auf die Erkennbarkeit lässt sich in zwei Gruppen zusammenfassen. Im Falle der Optimierung auf eine gleichmäßige Verteilung von E_{ver} und E_{hor} berücksichtigt die Optimierung der LVK die Eigenschaften der Deckschicht nicht. Im Falle der Optimierung auf eine homogene Leuchtdichtevertelung hingegen, wird die Charakteristik der jeweiligen Deckschicht bereits während der Optimierung berücksichtigt. Dementsprechend führt die Leuchtdichteoptimierung unter sonst gleichen Bedingungen vor allem bei niedrigem Querversatz zur Lichtpunktreihe (Fahrspur 1), mit unterschiedlichen Deckschichten zu sehr ähnlichen Ergebnissen für alle Deckschichtcharakteristika, wie Abbildung 5.12 deutlich macht. Bei höherem Querversatz (Fahrspur 0) wird bei gerichtet reflektierenden Oberflächen weniger Licht zum Beobachter hin reflektiert, der Hintergrund erscheint dunkler. So hebt sich das Objekt weniger stark vom Hintergrund ab und es resultieren niedrigere VL_i mit $\Delta|VL_{\text{med}}| < 5$.

Da die Reflexionseigenschaften bei den Beleuchtungsstärkeoptimierungen nicht berücksichtigt werden, fällt hier der Effekt der gerichteten Reflexionskomponenten auf das VL stärker aus. Wie Abbildung 5.13 illustriert, nimmt das $\Delta VL_{\text{min,max}}$ mit gerichtetem Anteil der Reflexion der Deckschicht stark zu.

Für geringen Querversatz gilt nach den Übersichten in Anhang A.5.2, dass sich bei der Optimierung nach der vertikalen Beleuchtungsstärke die VL -Verläufe mit steigendem Diffusanteil (kleine R- bzw. C-Kategorie) der Deckschichtreflexion verschlechtern. Bei größerem Querversatz lassen sich in keiner Situation gute Erkennbarkeiten erzielen. Allerdings herrschen auf Fahrspur 1 meist Negativkontraste vor, auf Fahrspur 0 dagegen Positivkontraste. Die resultierende Kontrastumkehr in der Mitte der Fahrbahn führt zu großflächigen kontrastarmen Bereichen.

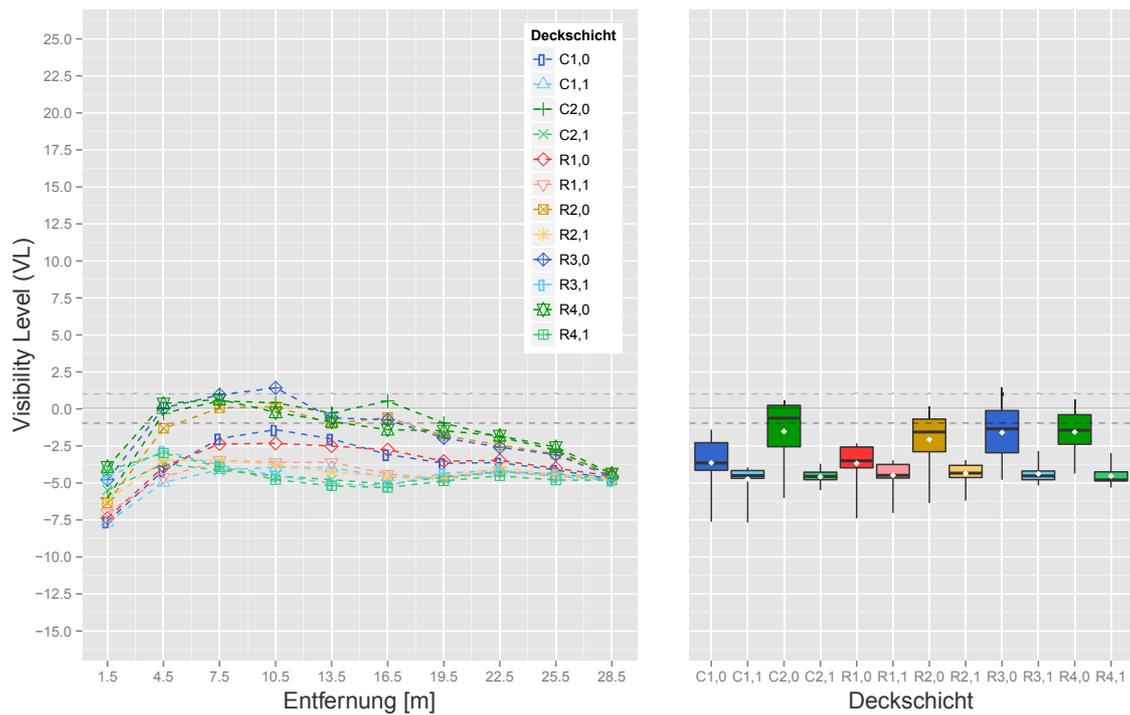


Abbildung 5.12: Typisches Ergebnis einer homogenen Verteilung der Leuchtdichte auf der Fahrbahn, Lichtpunktabstand 30 m, Sehobjektreflexionsgrad 20 %. Links VL-Verlauf entlang des Messfeldes, die Entfernung des jeweiligen Messpunktes bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes auf Höhe der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert der Bereich $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der links angeführten VL-Verläufe, Box der zwei inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (schwarzer Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

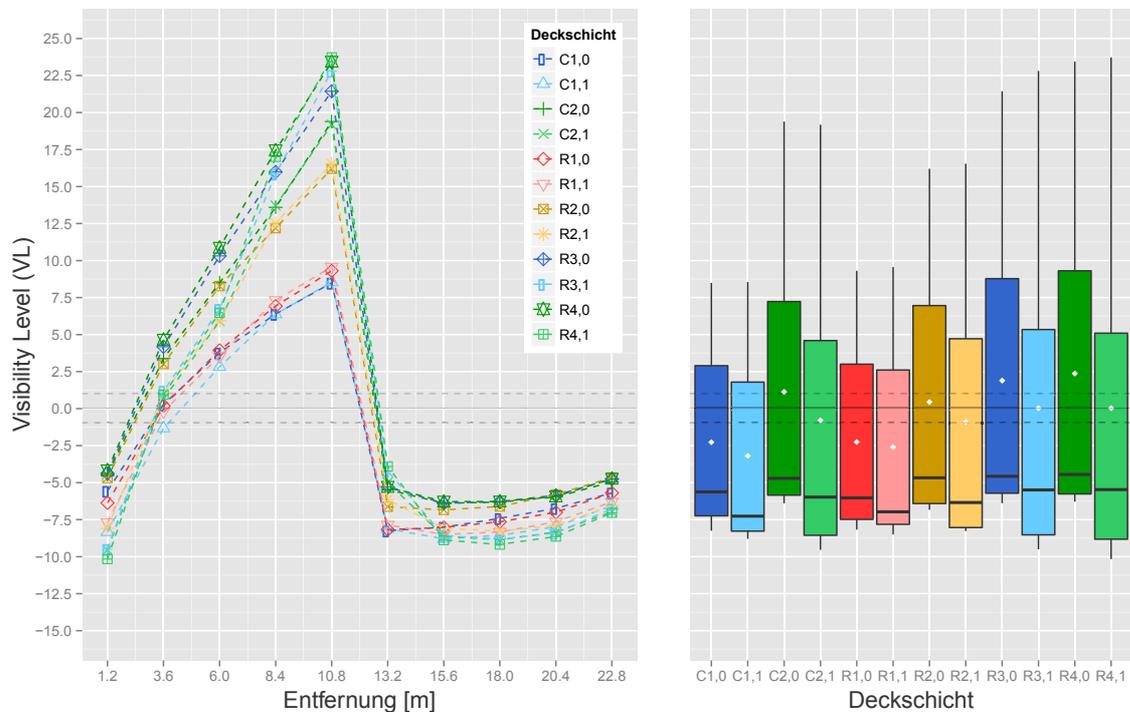


Abbildung 5.13: Typisches Ergebnis einer gleichmäßigen Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke, Lichtpunktabstand 24 m, Sehobjektreflexionsgrad 40 %, Layout entsprechend Abbildung 5.12.

5.2.3.3 EINFLUSS LICHPUNKTABSTAND

Über den Einfluss des Lichtpunktabstandes auf die VL-Verläufe der drei U_o -Optimierungen kann keine pauschale Aussage getroffen werden. Geometrie der Installation, Optimierungsart und – im Falle der Leuchtdichte – Deckschichtcharakteristik interagieren zu unterschiedlich. Gemein ist den beleuchtungsstärkeorientierten Optimierungen eine Dehnung der Verläufe bei der Vergrößerung der Lichtpunktabstände, wie Abbildung 5.14 veranschaulicht.

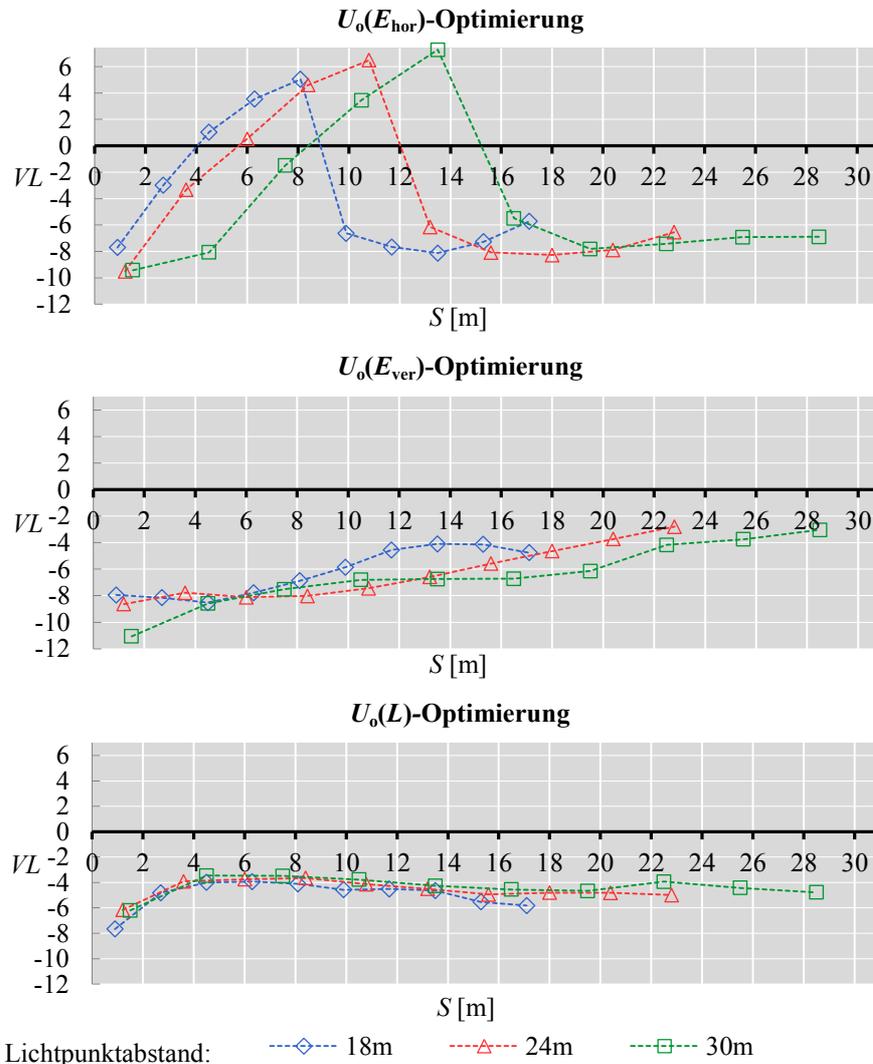


Abbildung 5.14: Charakteristische VL-Verläufe der U_o -orientierten Optimierungen nach Lichtpunktabständen. Sehobjektreflexionsgrad 20 %, Deckschicht R3, stationärer Beobachter.

Während die Vergrößerung des Mastabstandes bei der Optimierung auf die vertikale Beleuchtungsstärke keine eindeutige Tendenz hinsichtlich Minima, Medianen oder Mittelwerten aufweist, kommt es aufgrund der Vergrößerung des Lichtpunktabstandes zu einer Verschiebung der Verläufe der $U_o(E_{hor})$ -Optimierung ins Positive. Positivkontraste werden mit steigendem Lichtpunktabstand verstärkt, während Negativkontraste verflachen. Die Verläufe der Leuchtdichte verschlechtern sich tendenziell mit steigendem Mastabstand, da die VL-Verläufe der $U_o(L)$ -Optimierung auf dem Silhouette-Prinzip basieren. Im Gegensatz zu den Medianen, nehmen die minimalen VL_i mit steigendem Lichtpunktabstand entsprechend den Abbildungen 5.9 und 5.10 ab.

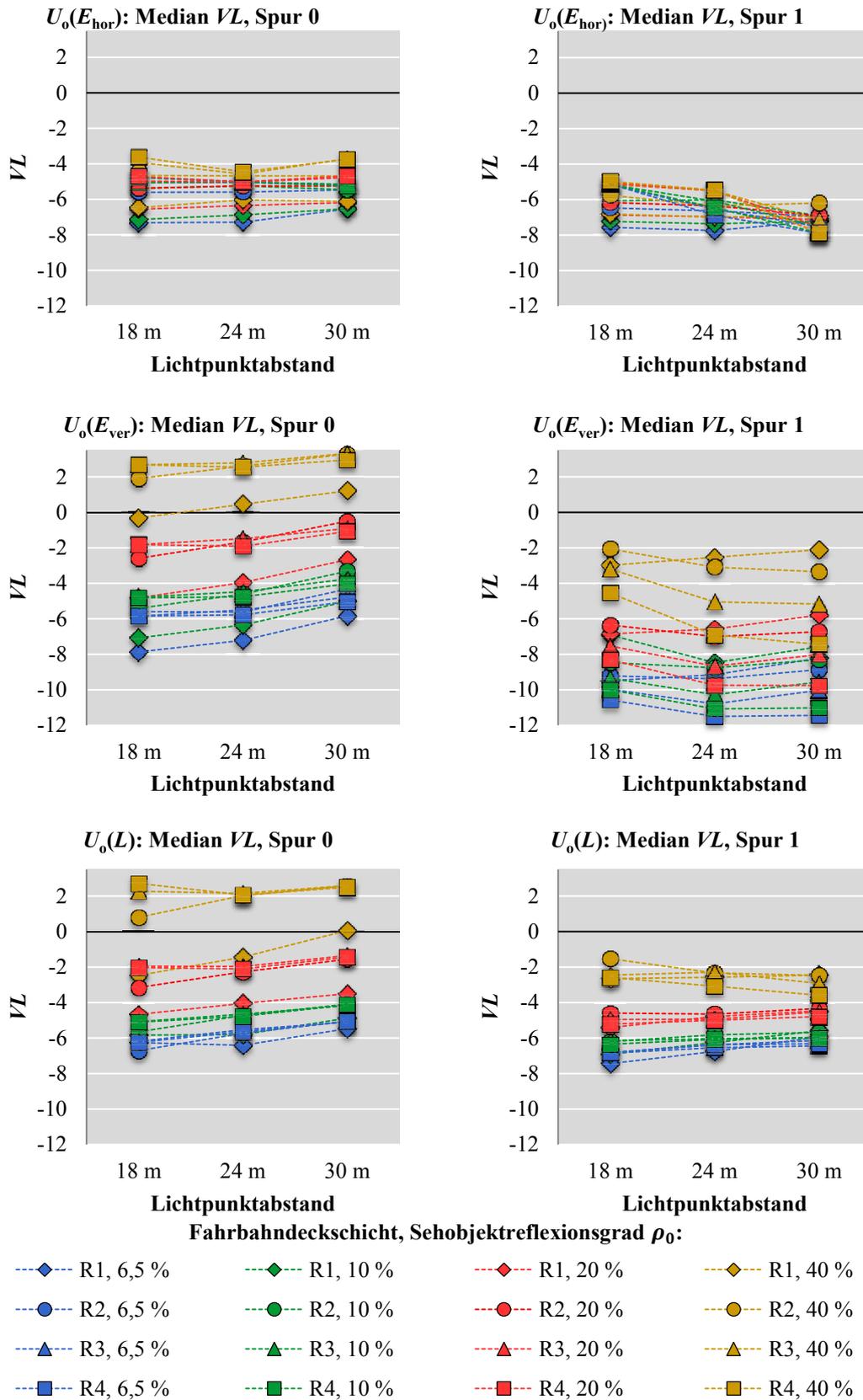


Abbildung 5.15: Übersicht Mediane VL in Abhängigkeit vom Mastabstand.

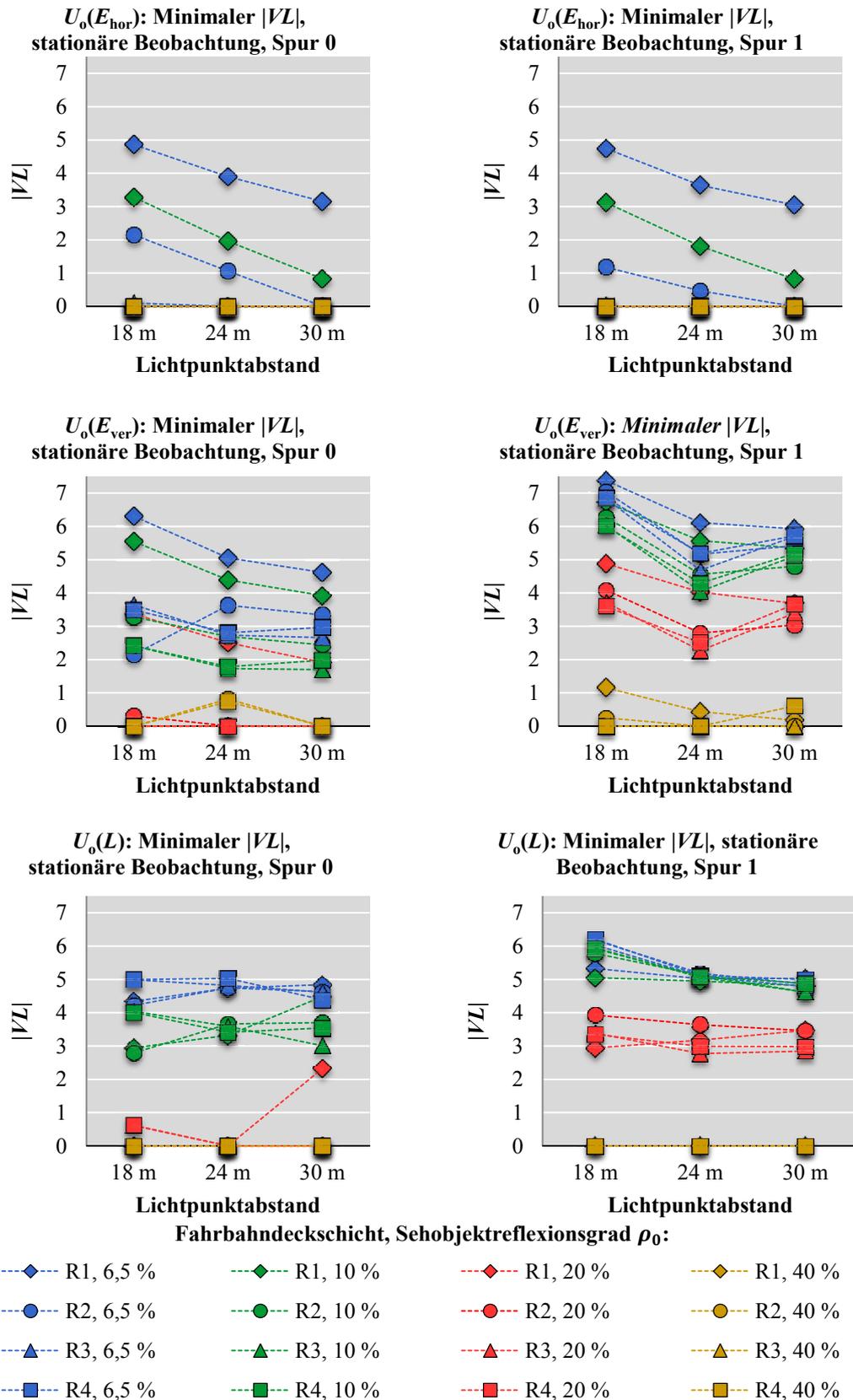


Abbildung 5.16: Übersicht minimale VL in Abhängigkeit vom Mastabstand.

5.2.3.4 VERGLEICH DER U_o -ORIENTERTEN ANSÄTZE

Die Optimierung auf eine maximal mögliche Gleichmäßigkeit erzielt weder bei den beleuchtungsstärkeorientierten Optimierungsansätzen, noch bei der Optimierung auf die Homogenität der Leuchtdichte situationsübergreifend gute Visibility-Level-Verläufe. Dabei spielt der Reflexionsgrad des Sehobjektes eine große Rolle. Wird zur Bewertung der Erkennbarkeit das kritische Sehobjekt mit $\rho_o = 0,4$ herangezogen, stoßen alle drei Optimierungsvarianten an ihre Grenzen. Das Objekt ist zu hell, um sich in Form des Negativkontrastes vom Untergrund abzuheben. Hell genug für hohe Positivkontraste ist es jedoch nur in der Anstrahlungsphase der $U_o(E_{hor})$ -Optimierung nach Abbildung 5.8.

Ausgenommen der $U_o(E_{hor})$ -Optimierung resultieren für typische Sehobjekte mit $\rho_o = 20\%$ bei wenig Querversatz durchgängig unkritische VL -Verläufe. Auf der den Leuchten abgewandten Fahrspur werden jedoch aufgrund der dort vorherrschenden niedrigeren Umfeldleuchtdichten, unabhängig von der Optimierungsart, oft kritische Erkennbarkeitsverläufe erzeugt. Bei der $U_o(E_{hor})$ -Optimierung resultieren in keiner der untersuchten Beleuchtungsszenen VL -Verläufe außerhalb der kritischen Erkennbarkeit. Insgesamt ergeben sich in 9 von 48 stationär beobachteten Szenen unkritische Erkennbarkeiten für typische Sehobjekte. Keine der Optimierungen erreicht für alle Situationen einen VL -Verlauf mit guten VL -Werten. In fast allen Fällen kommt es zu Kontrastumkehrungen, unabhängig von der Optimierungsmethode. Dem entgegen können Sehobjekte mit niedrigerem Reflexionsgrad als unkritisch angesehen werden, da sie meist gute Negativkontraste und entsprechend hohe $|VL|$ begünstigen (siehe Abbildung 5.17).

Unabhängig von der Wahl des Sehobjektes und der Beleuchtungsszene hebt sich die $U_o(E_{hor})$ -Optimierung in ihrer Art deutlich von den beiden anderen Varianten ab. Sie weist die in 5.2.3.1 und 5.2.3.2 ausführlich beschriebenen Schwankungen mit den beiden charakteristischen Kontrastumkehrungen auf. Diese sind vor- und nachteilig zugleich, denn zwischen den Kontrastumkehrungen werden erst durch Anstrahlung, dann durch Hinterleuchten des Sehobjektes gute Erkennbarkeiten erzielt. Konstant gute VL -Werte können jedoch nicht erzielt werden. Die $U_o(E_{hor})$ -Optimierung liefert dann gute Erkennbarkeiten, wenn Bereiche $|VL| \leq 1$ nicht vermieden werden können und diese Bereiche klein gehalten werden sollen. Denn nähern sich die VL -Verläufe der beiden anderen Optimierungsverfahren mit steigendem Reflexionsgrad des Sehobjektes immer weiter der kritischen Zone $|VL| \leq 1$ über einen großen Bereich des Messfeldes an, beschränken sich die Bereiche der $U_o(E_{hor})$ -Optimierung auf lediglich ein bis zwei kurze Nulldurchgänge, die jeweils weniger als 10 % des Messfeldes beinhalten. Bei der $U_o(L)$ - oder $U_o(E_{ver})$ -Optimierung kann eine ungünstige Kombination aus Installationsgeometrie und Wahl der Fahrbahndeckschicht dazu führen, dass mehr als 50 % des Messfeldes im kritischen VL -Bereich liegen. Ein Beispiel für diesen Effekt zeigt Abbildung 5.18. Während die Optimierung auf $U_o(E_{hor})$ in den Bereichen um Messpunkt 3 und zwischen Messpunkt 5 und 6 über eine kleine Fläche hinweg den kritischen VL -Bereich durchläuft, liegen die Verläufe von $U_o(L)$ und $U_o(E_{ver})$ auf Fahrspur 1 großflächig bei $|VL| < 1$.

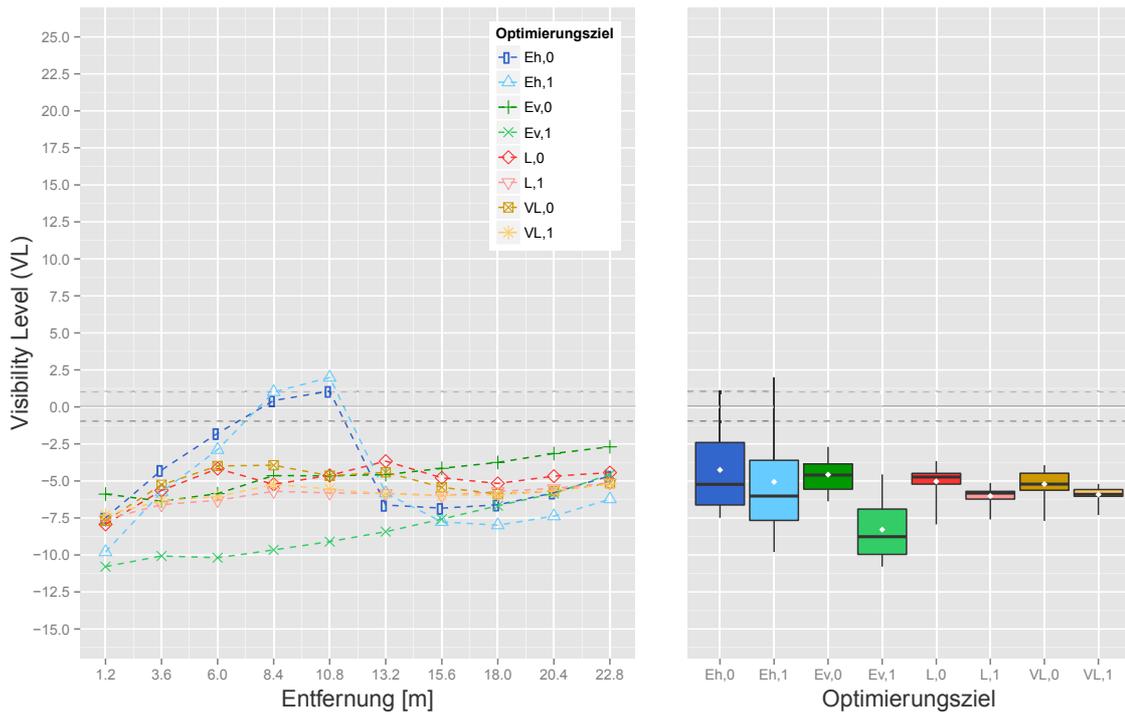


Abbildung 5.17: Übersicht der Optimierungsverfahren, Deckschicht R2, Sehöbjektreflexionsgrad 10 % bei 24 m Lichtpunkt Abstand. Links VL-Verlauf entlang des Messfeldes, die Entfernung des jeweiligen Messpunktes bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes auf Höhe der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der links angeführten Verläufe, Box der zwei inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (schwarzer Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

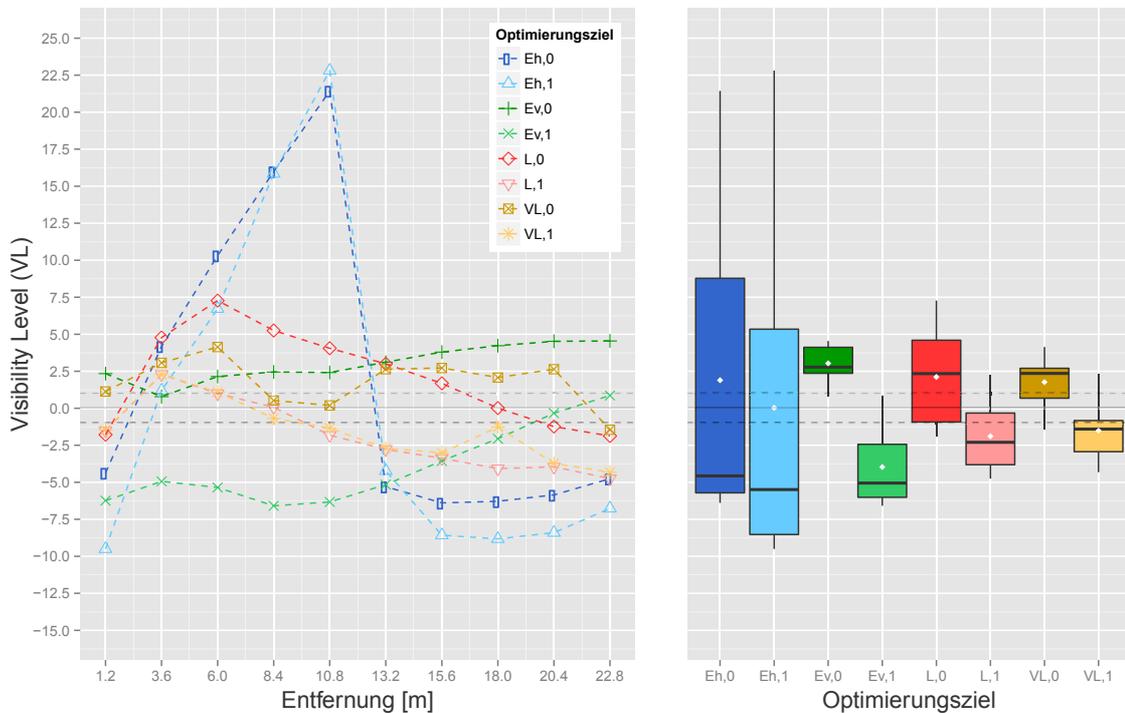


Abbildung 5.18: Übersicht der Optimierungsverfahren, Deckschicht R3, Sehöbjektreflexionsgrad 40 % bei 24 m Lichtpunkt Abstand, Layout entsprechend Abbildung 5.17.

Die Leuchtdichteoptimierung bietet bei typischen Sehobjekten eine bessere Performanz hinsichtlich der Erkennbarkeit. Hier sind die einzelnen $|VL|$ zwar nicht immer so hoch wie die der E_{hor} -Optimierung, doch leistet sich die L -Optimierung in fast allen Situationen keine $|VL|$ -Werte im kritischen Erkennbarkeitsbereich, so dass Kontrastverflachungen nur selten entstehen.

Für alle untersuchten Beleuchtungssituationen mit E_{ver} - und L -Optimierung gilt, dass bei kleinerem Querversatz der Sehobjekte zur Lichtpunkttrienachse auf Fahrspur S_1 bessere VL -Verläufe erzielt werden als bei größerem Querversatz der Fahrspur S_0 . Bei der E_{hor} -Optimierung tritt dieser Effekt eher bei gerichtet reflektierenden Fahrbahndeckschichten auf. Am größten sind die versatzbedingten Unterschiede bei der $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung. Hier weichen die Mediane oft um $|\Delta VL| \geq 5$ ab.

5.2.4 RESULTIERENDE ERKENNBARKEITEN, DYNAMISCHE BEOBACHTUNG

Der Einfluss des Sehobjektreflexionsgrades verhält sich in beiden Beobachtungsformen ähnlich. Unter U_o -optimierter E_{hor} kann der dynamische Beobachter Sehobjekte mit höherem Reflexionsgrad in der ersten Hälfte des Bewertungsfeldes besser sehen als Objekte mit sehr niedrigem Reflexionsgrad. Insgesamt ergeben sich für den dynamischen Beobachter hier größere Kontrastbeträge. Abbildung 5.20 zeigt dieselbe Beleuchtungsszene wie Abbildung 5.7, jedoch unter dynamischer Beobachtung. Die $|VL|$ -Werte liegen deutlich höher als bei der stationären Beobachtung. Im Falle der $U_o(E_{\text{hor}})$ -Optimierung sind zusätzlich zu den besseren VL -Beträgen die Bereiche kritischer Erkennbarkeit kleiner. Dies ist anhand der steileren Null-Durchgänge des VL -Graphen sichtbar.

Beim Vergleich der erkennbarkeitsbezogenen Qualitätskennzahlen innerhalb Abbildung 5.19 entsteht ein situationsübergreifendes Bild von den Erkennbarkeiten unter den beiden Beobachtungsformen. Für das als typisch definierte Objekt von $\rho_o = 20\%$ werden mit einer Optimierung auf maximale Gleichmäßigkeit lediglich bei 1 von 12 dynamisch beobachteten Beleuchtungsszenen durchgehend $|VL|_i \geq 1$ erzielt. Bei der $U_o(E_{\text{hor}})$ -Optimierung weisen für dieses Objekt alle Situationen einzelne $|VL|_i$ -Werte < 1 auf. Aufgrund des Silhouette-Prinzips nehmen die $|VL|_i$ bei $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung und $U_o(L)$ -Optimierung mit sinkendem ρ_o zu, so dass $\rho_o = 10\%$ und $\rho_o = 6,5\%$ durchgehend $|VL|_i \geq 1$ aufweisen. Abbildung 5.21 und Abbildung 5.22 visualisieren diesen Effekt.

Für alle untersuchten Beleuchtungssituationen mit E_{ver} -Optimierung und L -Optimierung gilt auch unter dynamischer Beobachtung, dass alle kritischen Sehobjekte kritische Erkennbarkeiten erfahren (siehe auch Anhang A.5). Unter separater Betrachtung der einzelnen Fahrspuren gibt es bei 36 untersuchten Fällen nur einen (R2-Deckschicht, dynamische Beobachtung, 24 m Lichtpunktastand, Fahrspur 1, $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung) ohne Kontrastumkehr. Da selbst in dieser Situation $|VL| < 1$ ist, kann zusammengefasst werden, dass das kritische Sehobjekt in allen untersuchten U_o -orientierten Optimierungen kritische Erkennbarkeiten $|VL| < 1$ aufweist. Sofern die $U_o(L)$ -Optimierung durchgehend unkritische VL -Verläufe bereitstellen kann, ist sie aufgrund der kontrastumkehrbedingten $|VL|_i < 1$ der $U_o(E_{\text{hor}})$ -Optimierung die Optimierung mit den besseren und daher sicherheitsrelevanten eingehaltenen $|VL|$ -Mindestwerten. Dies ist in 93 von 144 untersuchten VL -Verläufen unter stationärer Beobachtung und in 30 von 48 Verläufen bei dynamischem Beobachter der Fall. Jedoch entfallen 36 von 51 (stationäre Beobachtung) und 12 von 18 (dynamische Beobachtung) kritische Situationen auf das kritische Sehobjekt mit

$\rho_o = 40\%$. Für $\rho_o = 20\%$ und niedriger gilt, dass von 108 untersuchten stationär beobachteten VL-Verläufen lediglich 15 kritische Erkennbarkeiten aufweisen, also weniger als 14%, äquivalent 6 von 36 unter dynamischer Beobachtung. Dies entspricht weniger als 17%. Ob die dynamische oder die stationäre Beobachtung zur Bewertung der Erkennbarkeit herangezogen wird, bleibt weitgehend ohne Einfluss. Dies zeigt ein Vergleich zwischen den VL-Verläufen der $U_o(L)$ -Optimierung nach Abbildung 5.22 und Abbildung 5.10 aus Kapitel 5.2.3.1.

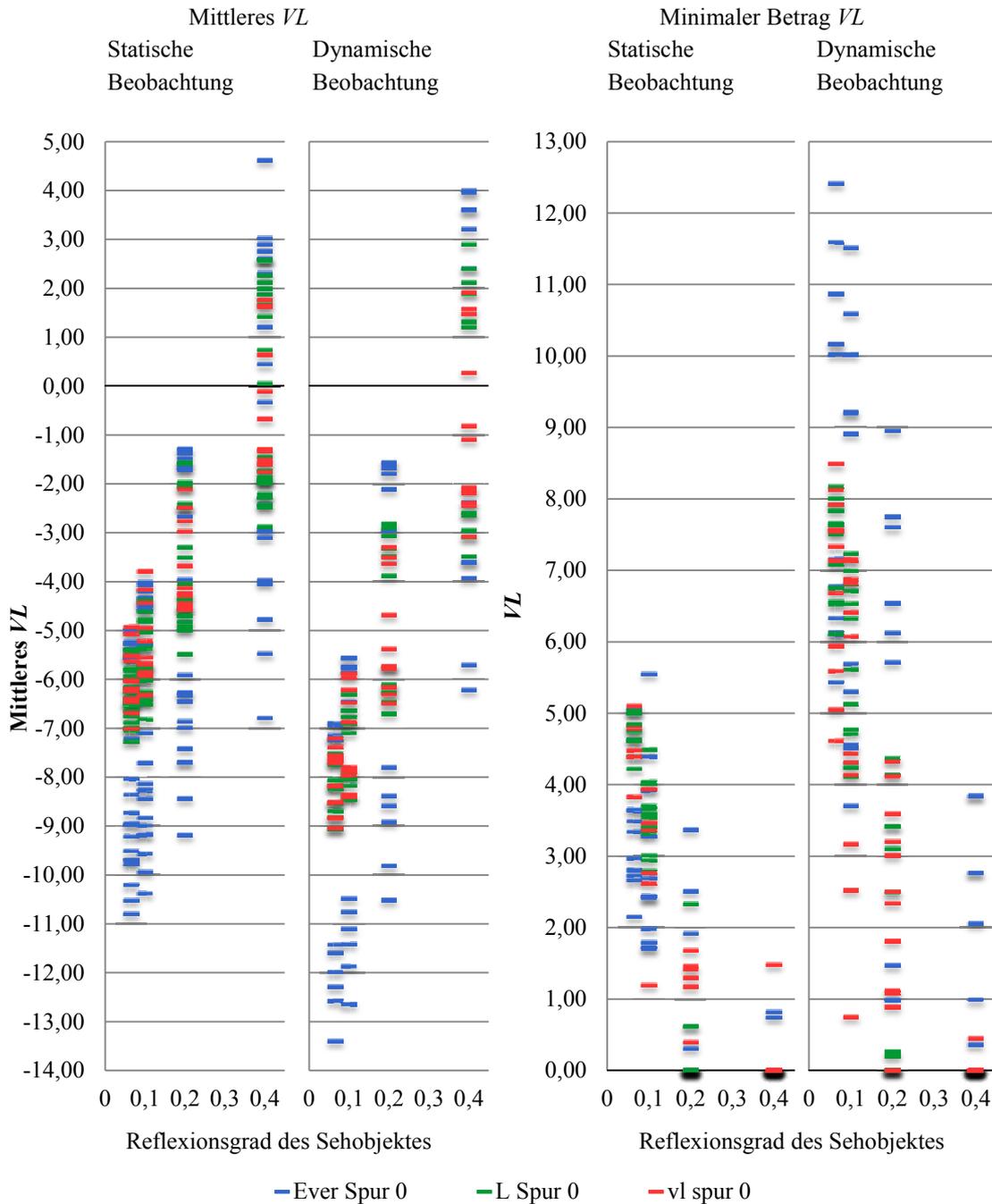


Abbildung 5.19: Zusammenfassende Übersicht der mittleren und minimalen VL aller untersuchten Beleuchtungssituationen gleichmäßiger vertikaler Beleuchtungsstärke, gleichmäßiger Leuchtdichte und VL-Optimierung nach Sehobjektreflexionsgrad.

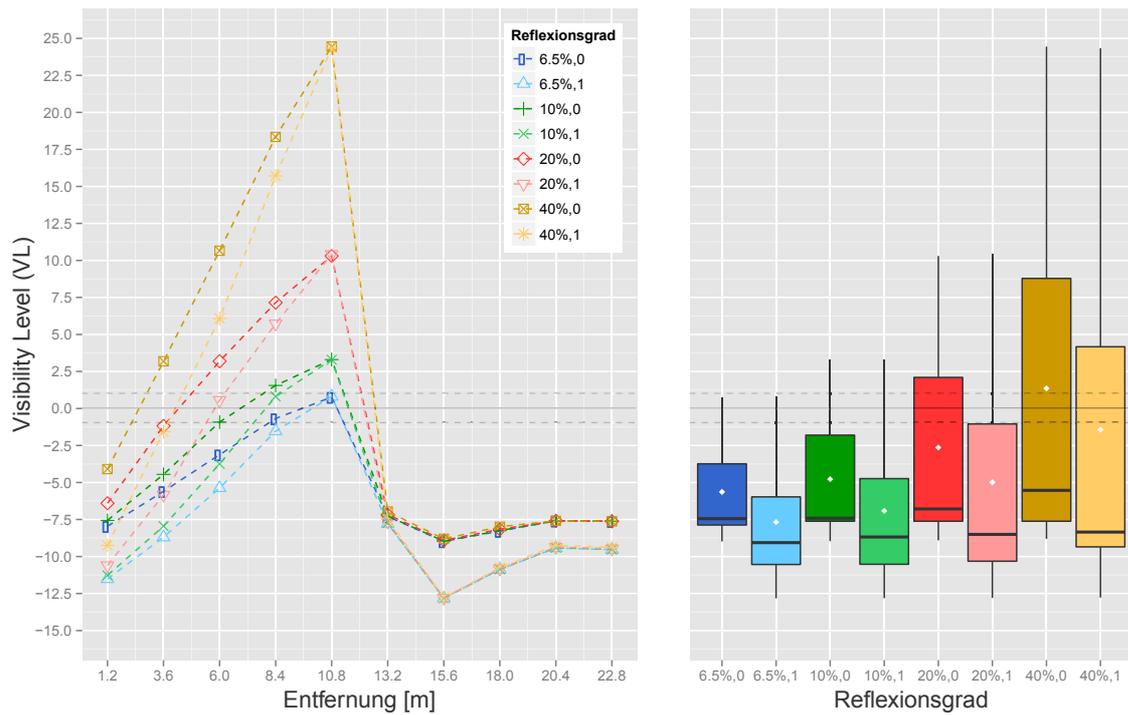


Abbildung 5.20: $U_o(E_{hor})$ -Optimierung, 24 m, R3, Variation des Sehobjektes, dynamische Beobachtung. Links VL-Verlauf entlang des Messfeldes, die Entfernung des jeweiligen Messpunktes bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes auf Höhe der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert der Bereich $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der links angeführten VL-Verläufe, Box der zwei inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (schwarzer Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

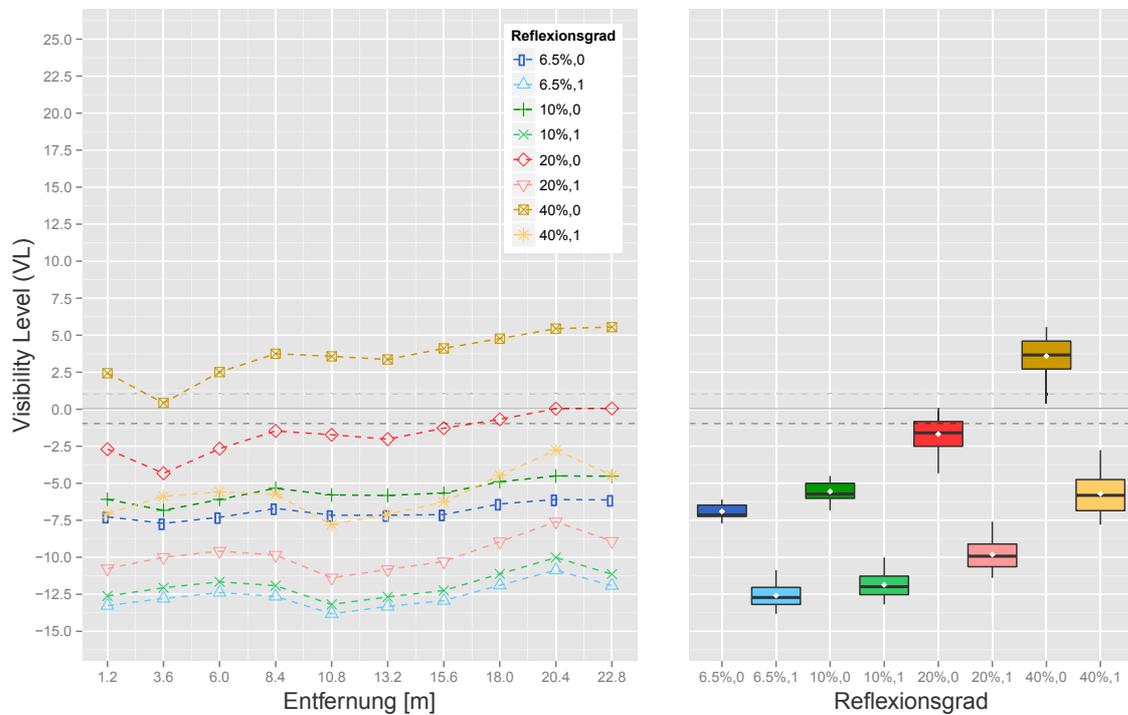


Abbildung 5.21: $U_o(E_{ver})$ -Optimierung, 24 m, R3, dynamische Beobachtung. Layout entsprechend Abbildung 5.20.

Von 144 ausgewerteten VL-Verläufen weisen unter dynamischer Beobachtung 81 kritische Erkennbarkeiten auf, bei dynamischem Beobachter sind dies 74. Die stationäre Beobachtung ist somit aus Sicht der Erkennbarkeit die kritischere und eine Bewertung nach dieser aus Sicht der Sicherheit als konservativer anzusehen, da etwaige Abweichungen die Erkennbarkeit an gleicher Stelle schlechter werden lassen. Sofern ausreichend detaillierte Reflexionstabellen der Fahrbahndeckschicht vorliegen, wird nach Arbeitshypothese U3-B aus Kapitel 3.3 die stationäre Beobachtung als eine Vereinfachung in der Praxis ohne negative Auswirkungen auf die Bewertung der Erkennbarkeit empfohlen.

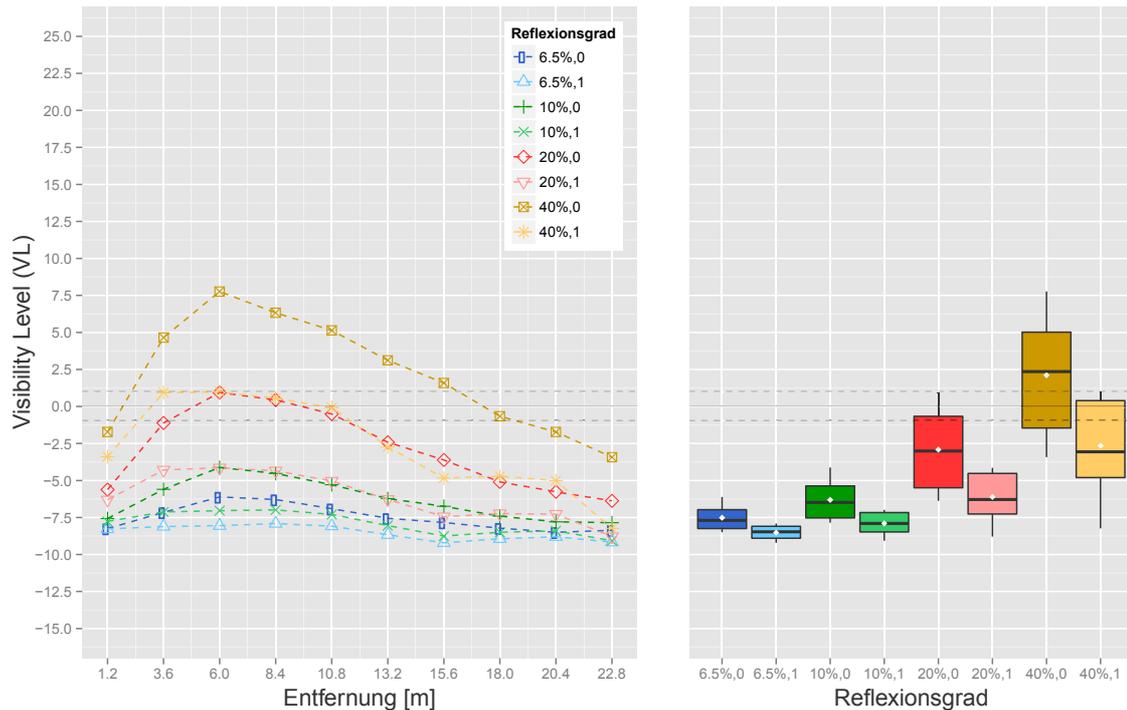


Abbildung 5.22: $U_o(L)$ -Optimierung 24 m, R3, dynamische Beobachtung. Links VL-Verlauf, die Entfernung des jeweiligen Messpunktes bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes auf Höhe der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert der Bereich $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der links angeführten VL-Verläufe, Box der inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (schwarzer Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

5.2.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Ergebnisse der untersuchten Szenarien zeigen, dass akzeptable Erkennbarkeitsverhältnisse von durchgehend $|VL_i| \geq 1$ hier ausschließlich als Silhouette-Prinzip vorkommen. Das in 3.2 als kritisch definierte Sehobjekt mit $\rho_o = 40\%$ erfährt in allen untersuchten Beleuchtungsszenen eine Kontrastumkehr. Dieser Effekt stützt Arbeitshypothese U3-C aus Unterkapitel 3.3. Nach dieser gibt es einen kritischen Sehobjektreflexionsgrad, ab welchem eine Optimierung der LVK nach dem Silhouette-Prinzip keine hinreichend guten Erkennbarkeiten mehr bereitstellen kann. Für das als typisch definierte Objekt von $\rho_o = 20\%$ hängen unkritische VL-Verläufe bei der $U_o(E_{\text{ver}})$ - und der $U_o(L)$ -Optimierung von Geometrie und Fahrbahndeckschicht ab. Für die $U_o(E_{\text{hor}})$ -Optimierung weisen hier allerdings alle Situationen $|VL| < 1$ auf. Dies gilt oftmals auch für $\rho_o = 10\%$ und $\rho_o = 6,5\%$, welche für die anderen Optimierungen unkritisch sind.

Anhand der VL -Ergebnisse kann die $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung VL -Verläufe ähnlich der $U_o(L)$ -Optimierung erzielen und wäre somit als alternative oder ergänzende Planungsgrundlage gemäß der in Unterkapitel 3.3 definierten Arbeitshypothese U1-D möglich. Jedoch wird in Kapitel 5.4.2 ausführlich die Problematik der Ergebnisse der $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung bezüglich der TI -Werte diskutiert, die ihre Anwendung einschränkt.

Die $U_o(E_{\text{hor}})$ -Optimierung verursacht charakteristische Kontrastumkehrungen mit kritischen VL -Werten. Diese nehmen jedoch nur einen kleinen Teil des Bewertungsfeldes ein. Entsprechend dem Anteil der Fläche kritischer Erkennbarkeit kann dies dazu führen, dass diese Art der Optimierung in manchen Fällen die bessere Alternative ist. Denn $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung und $U_o(L)$ -Optimierung weisen große Bereiche niedriger Erkennbarkeit auf, wenn es nicht möglich ist, durchgängig VL_i -Werte < -1 zu erzielen. So gilt für Arbeitshypothese U1-B aus Unterkapitel 3.3: Sofern die $U_o(L)$ -Optimierung durchgehend unkritische VL_i -Verläufe bereitstellen kann, ist sie die Optimierung mit den besseren sicherheitsrelevanten $|VL_i|$ -Minimalwerten. Für alle Beleuchtungsszenen, in denen die $U_o(L)$ -Optimierung $|VL_i| < 1$ aufweist, gilt die $U_o(E_{\text{hor}})$ -Optimierung als bessere Variante, da die Flächen mit $|VL_i| < 1$ kleiner und die Beträge der VL außerhalb dieser Flächen größer als im Fall der $U_o(L)$ -Optimierung sind.

Im Vergleich zur dynamischen ist die stationäre Beobachtung gegenüber einer Quantifizierung der Sicherheit als kritischer und somit besser anzusehen. Sofern also ausreichend umfangreiche Reflexionstabellen der Fahrbahndeckschicht vorliegen, kann, entsprechend der Arbeitshypothese U3-B aus Unterkapitel 3.3, die stationäre Beobachtung als eine Vereinfachung in der Praxis ohne negative Auswirkungen auf die Bewertung der Erkennbarkeit empfohlen werden. So ist, unabhängig von den untersuchten lichttechnischen Qualitätskennzahlen der Straßenbeleuchtung und den beiden berücksichtigten Beobachtungsformen, die Maximierung der Gesamtgleichmäßigkeit keine Garantie für gute Erkennbarkeiten gemäß der VL -Verläufe.

5.3 ERKENNBARKEITSORIENTIERTE OPTIMIERUNG

Im Gegensatz zu den in Unterkapitel 5.2 beschriebenen Vorgehensweisen berücksichtigt die direkte Optimierung auf alle einzelnen VL -Werte nicht die Gleichmäßigkeit der Lichtverteilung auf der Fahrbahn und kann zu speziellen Ungleichmäßigkeiten von Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke führen. Dieser Effekt wird explizit in Abschnitt 5.3.3 diskutiert. Die Optimierung der Erkennbarkeit erfolgt bei dynamischer Beobachtung entsprechend der Konventionen in Kapitel 2.1.3 und 3.2. Da die statische Beobachtung hauptsächlich hinsichtlich ihres Potentials der Vereinfachung der Beobachtungsbedingungen betrachtet wird, werden die Ergebnisse bei statischer Beobachtung in 5.3.3 zwar berücksichtigt, sie basieren jedoch auf der Optimierung für dynamische Beobachtung.

5.3.1 REALISIERTE LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKÖRPER

Analog zu den in Abschnitt 5.2.1 vorgestellten LVK der gleichmäßigkeitsorientierten Optimierungen geben folgend die Tabellen 5.7 und 5.8 eine Übersicht über die berechneten Lichtstärkeverteilungskörper der VL -Optimierung. Auch hier repräsentiert der blaue Volumenschnitt die C0-C180-Ebene der LVK, der rote Schnitt die C90-C270-Ebene. Das Koordinatensystem ist in

30°-Schritte unterteilt. Die Darstellung der LVK ist der Übersichtlichkeit halber zueinander relativ und nicht auf die gleiche Skalierung normiert.

Die Lichtstärkeverteilungskörper der VL-Optimierung ähneln in der C0-C180-Ebene den LVK, welche recht gleichmäßige Leuchtdichten von $U_o \geq 0,4$ auf der Fahrbahn realisieren. Dies gilt sowohl für die in Abbildung 5.23 angeführten LVK für die Deckschicht R2 als auch für die der Deckschicht R3 zugeordneten LVK aus Abbildung 5.24. Die VL-LVK weisen allerdings wesentlich höhere Quer- und Diagonalkomponenten auf.

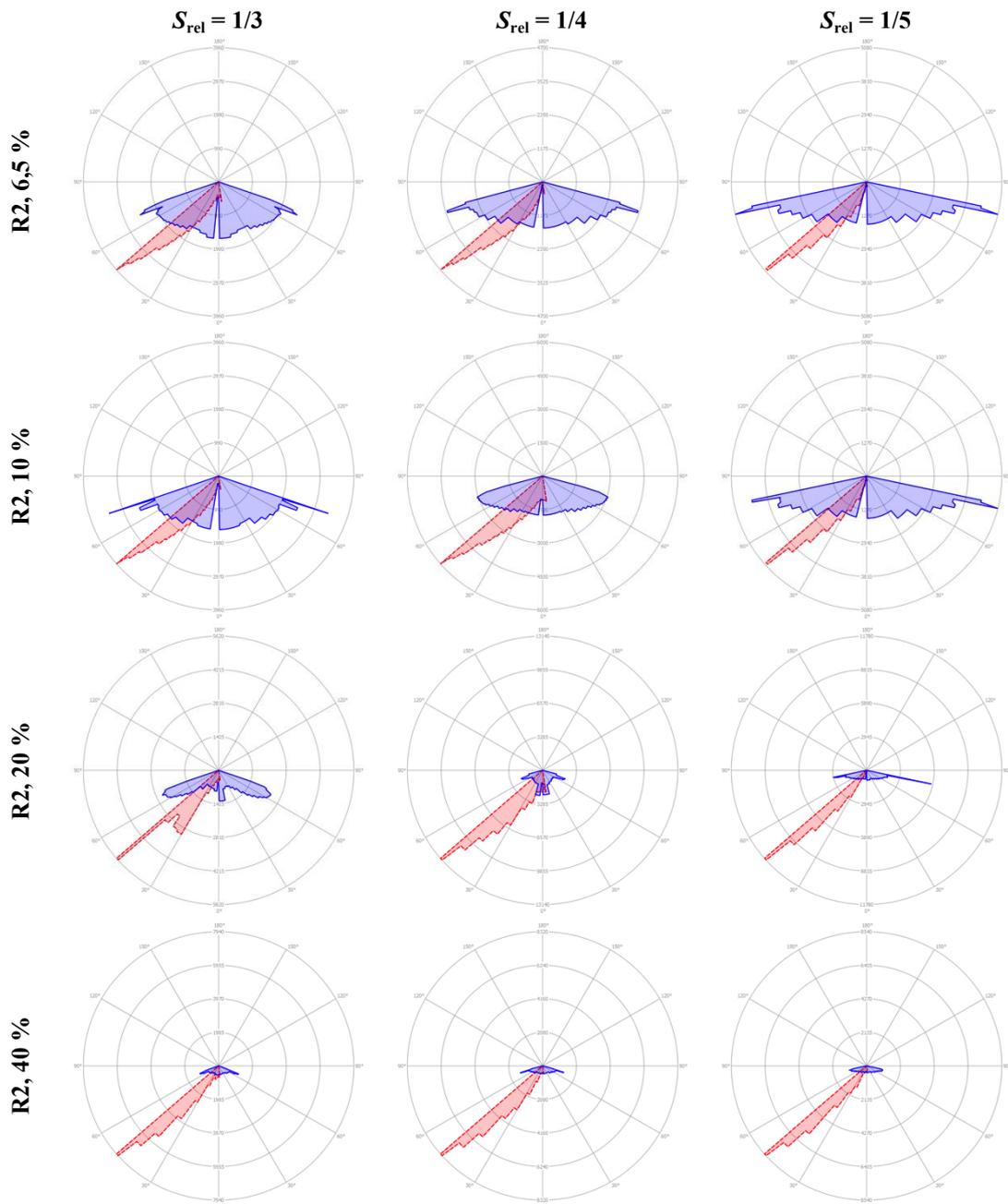


Abbildung 5.23 Realisierte Lichtstärkeverteilungskörper der Visibility-Level-Optimierung, Teil 1: Deckschicht R2, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30°-Schritten, relative Darstellung.

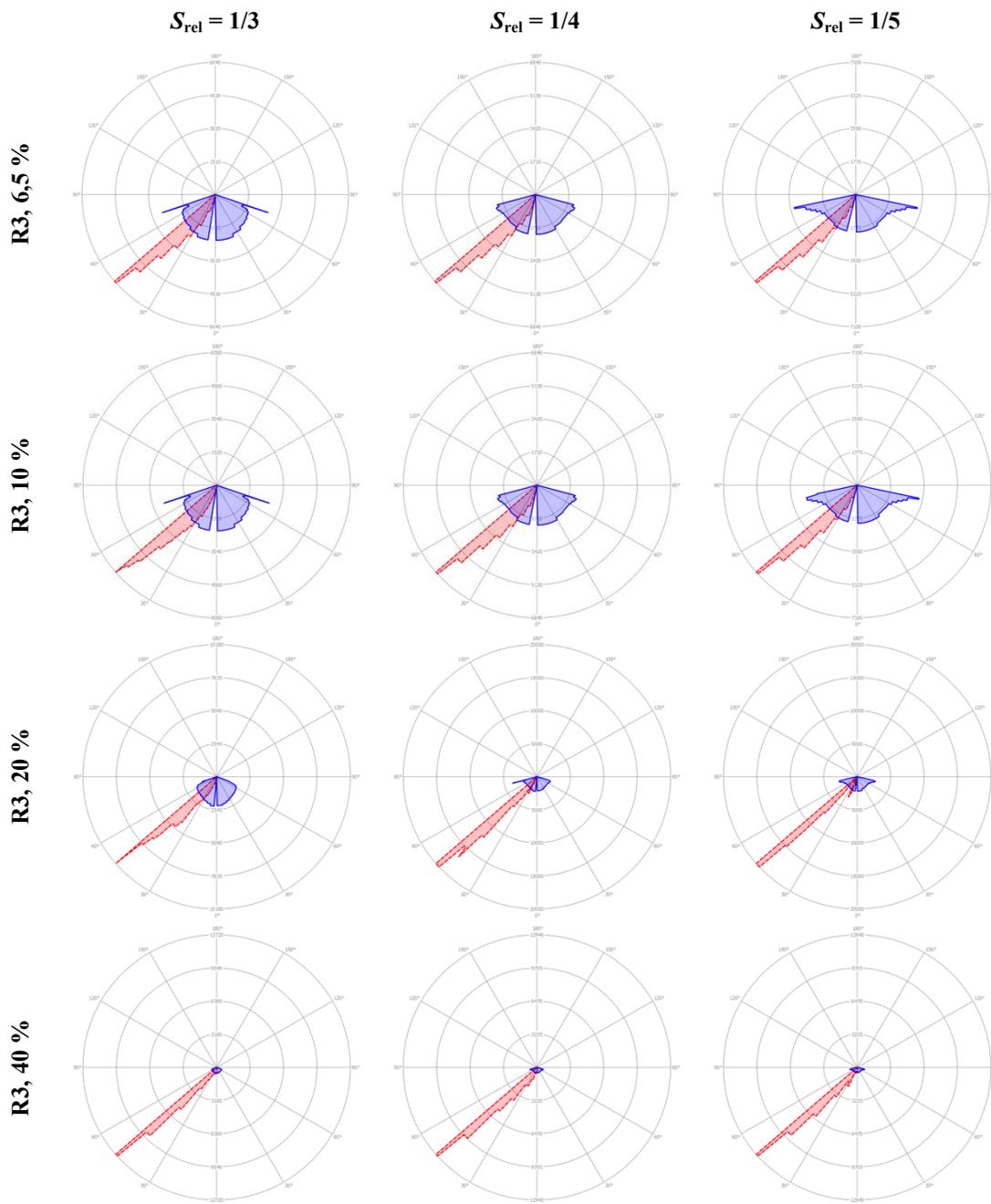


Abbildung 5.24: Realisierte Lichtstärkeverteilungskörper der Visibility-Level-Optimierung, Teil 2: Deckschicht R3, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30°-Schritten, relative Darstellung.

In Abbildung 5.25 ist die vergleichsweise starke Ausprägung der Lichtstärken um die C0-C180-Ebene quer zur Fahrbahn deutlich zu erkennen. Sie resultieren daraus, dass die vertikalen Beleuchtungsstärken längs der Fahrbahn, welche aufgrund der Sehobjekt-Anstrahlung zu einer Verflachung des Negativkontrastes führen können, minimiert werden. Daher wächst mit steigendem Sehobjektreflexionsgrad das Verhältnis der hier visualisierten Lichtstärken in der C90-C270-Ebene zu denen der C0-C180-Ebene.

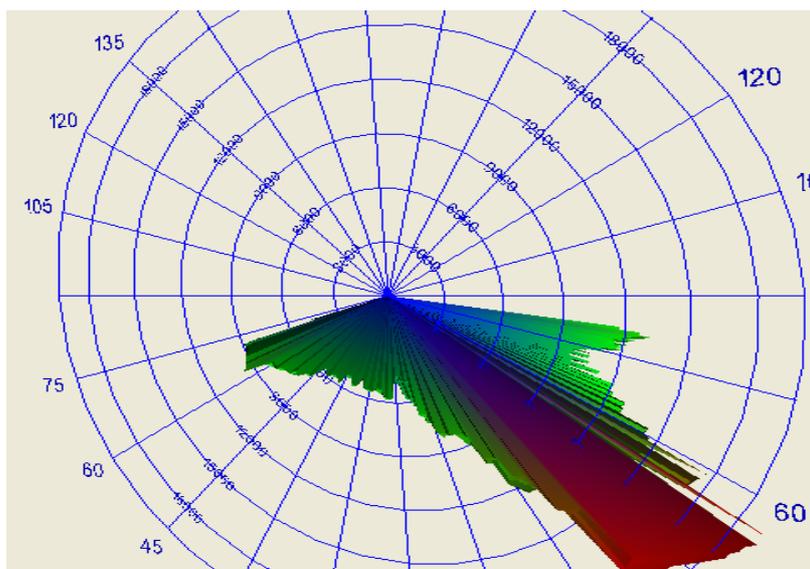


Abbildung 5.25: Typische Ausprägung einer VL-optimierten LVK mit niedrigen Längs- und hohen Diagonal- und Querkomponenten, Darstellung in C90-C270-Ebene.

Aufgrund der weniger gerichteten Reflexion der R2-Deckschicht sind die Lichtstärken flacher Abstrahlwinkel in C0-C180-Ebene in dieser Kategorie größer als die der LVK für die R3-Deckschicht. Die Charakteristik der Zunahme der Lichtstärkekomponenten quer zur Fahrbahn ist bei beiden Deckschichten zu finden. Die nicht vollkommen symmetrische Form der Verteilungen resultiert aus Interpolationsunsicherheiten, welche ausführlich in Kapitel 7.2.1 diskutiert werden.

5.3.2 RESULTIERENDE LICHTVERTEILUNGEN

Die Lichtverteilungen auf der Fahrbahn spiegeln die Charakteristik der verschiedenen LVK der VL-Optimierung vor allem hinsichtlich des Lichtstärke-Verhältnisses von Längsrichtung C0-C180-Ebene zu Querrichtung C90-C270-Ebene wieder. Abbildung 5.26 und Abbildung 5.27 zeigen die Lichtverteilungen auf der Fahrbahn aus der Draufsicht exemplarisch für die Beleuchtungsszene $S_{\text{rel}} = 1/4 - 24$ m Mastabstand für R2- und R3 Deckschicht. Deutlich zu erkennen ist der mit steigendem Reflexionsgrad des Sehobjektes wachsende Zwischenraum sehr niedriger horizontaler Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten im Mittelteil des Bewertungsfeldes. Dieser Effekt resultiert aus der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Vermeidung vertikaler Komponenten der LVK, welche für die Anstrahlung von Sehobjekten in Betracht kommen. Der Optimierungsalgorithmus versucht diese, aufgrund der VL-Optimierung nach dem Silhouette-Prinzip, zu minimieren. Je heller das Sehobjekt ist, desto mehr Licht wird zum Beobachter reflektiert und desto kleiner wird der Kontrast zwischen Objekt und Umfeld, so dass der Algorithmus restriktiv eingreift, um Kontrastverflachung zu vermeiden. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Zunahme des Sehobjektreflexionsgrades und einer Abnahme der Gleichmäßigkeiten besteht jedoch situationsübergreifend für die untersuchten Beleuchtungsszenen nicht.

Aufgrund der hohen Lichtstärken in Querrichtung (C90-C270-Ebene) entstehen auf der den Lichtpunkten abgewandten S_0 gerade bei großen Mastabständen mit $S_{\text{rel}} = 1/5$ deutliche Anstiege der Leuchtdichten und horizontalen Beleuchtungsstärken zum Fahrbahnrand hin. Dies

äußert sich in den entsprechenden U_o - und U_l -Werten für die S_0 . Tabelle 5.1 zeigt die erzielten Gesamtgleichmäßigkeiten von Leuchtdichte $U_{o,L}$ und horizontaler Beleuchtungsstärke $U_{o,Ehor}$ sowie der Leuchtdichtelängsgleichmäßigkeit $U_{l,L}$. $U_{o,L}$ variiert je nach untersuchter Situation von 0,47 bis 0,78, $U_{l,L}$ von 0,45 bis 0,90 und $U_{o,Ehor}$ variiert von 0,16 bis 0,36 in einem sehr niedrigen Gleichmäßigkeitsbereich. Die VL-optimierten LVK entsprechen hinsichtlich der Ergebnisse der Gleichmäßigkeiten eher leuchtdichteoptimierten LVK. Alle untersuchten Konfigurationen würden nach der Leuchtdichtebewertung der aktuellen DIN EN 13201-2 [DIN2007E, S. 7] die $U_{o,L}$ -Anforderungen ihrer Leuchtdichteklasse von $U_{o,L} \geq 0,4$ erfüllen. Die $U_{l,L}$ -Anforderungen von $U_{l,L} \geq 0,5$ bzw. $U_{l,L} \geq 0,6$ werden in 5 von 6 der untersuchten Situationen erreicht.

Tabelle 5.1: VL-Optimierung, Gleichmäßigkeiten der Lichtverteilungen und Grad der Erfüllung nach DIN EN 13201-2 für ME4- bzw. CE4-Klassen für die untersuchten Beleuchtungsszenen .

18 m, $S_{rel} = 1/3$							
	ρ_0 [%]	Fahrspur 0			Fahrspur 1		
		U_o	U_l	U_{oEhor}	U_o	U_l	U_{oEhor}
R2	6,5	0,78	0,90	0,56	0,78	0,90	0,56
	10	0,60	0,69	0,53	0,65	0,69	0,53
	20	0,52	0,52	0,43	0,52	0,52	0,43
	40	0,48	0,46	0,30	0,50	0,45	0,30
R3	6,5	0,65	0,85	0,36	0,72	0,85	0,36
	10	0,71	0,84	0,36	0,72	0,84	0,36
	20	0,74	0,80	0,35	0,77	0,80	0,35
	40	0,63	0,56	0,27	0,62	0,56	0,27
24 m, $S_{rel} = 1/4$							
	ρ_0 [%]	Fahrspur 0			Fahrspur 1		
		U_o	U_l	U_{oEhor}	U_o	U_l	U_{oEhor}
R2	6,5	0,47	0,62	0,36	0,47	0,62	0,36
	10	0,83	0,90	0,40	0,83	0,90	0,40
	20	0,50	0,50	0,25	0,50	0,50	0,25
	40	0,63	0,62	0,29	0,65	0,62	0,29
R3	6,5	0,61	0,79	0,24	0,65	0,79	0,24
	10	0,61	0,79	0,24	0,65	0,79	0,24
	20	0,63	0,75	0,23	0,65	0,76	0,23
	40	0,54	0,64	0,21	0,64	0,67	0,21
30 m, $S_{rel} = 1/5$							
	ρ_0 [%]	Fahrspur 0			Fahrspur 1		
		U_o	U_l	U_{oEhor}	U_o	U_l	U_{oEhor}
R2	6,5	0,47	0,80	0,28	0,67	0,80	0,28
	10	0,61	0,79	0,27	0,67	0,79	0,27
	20	0,45	0,66	0,25	0,57	0,69	0,25
	40	0,49	0,66	0,26	0,66	0,62	0,26
R3	6,5	0,50	0,74	0,17	0,56	0,74	0,17
	10	0,49	0,67	0,16	0,54	0,67	0,16
	20	0,59	0,87	0,19	0,57	0,75	0,19
	40	0,50	0,72	0,17	0,54	0,77	0,17

Anforderung nach DIN EN 13201-2 für ME4- bzw. CE4-Klassen
 nicht erfüllt
 erfüllt für Klasse ME4b, nicht ME4a
 erfüllt

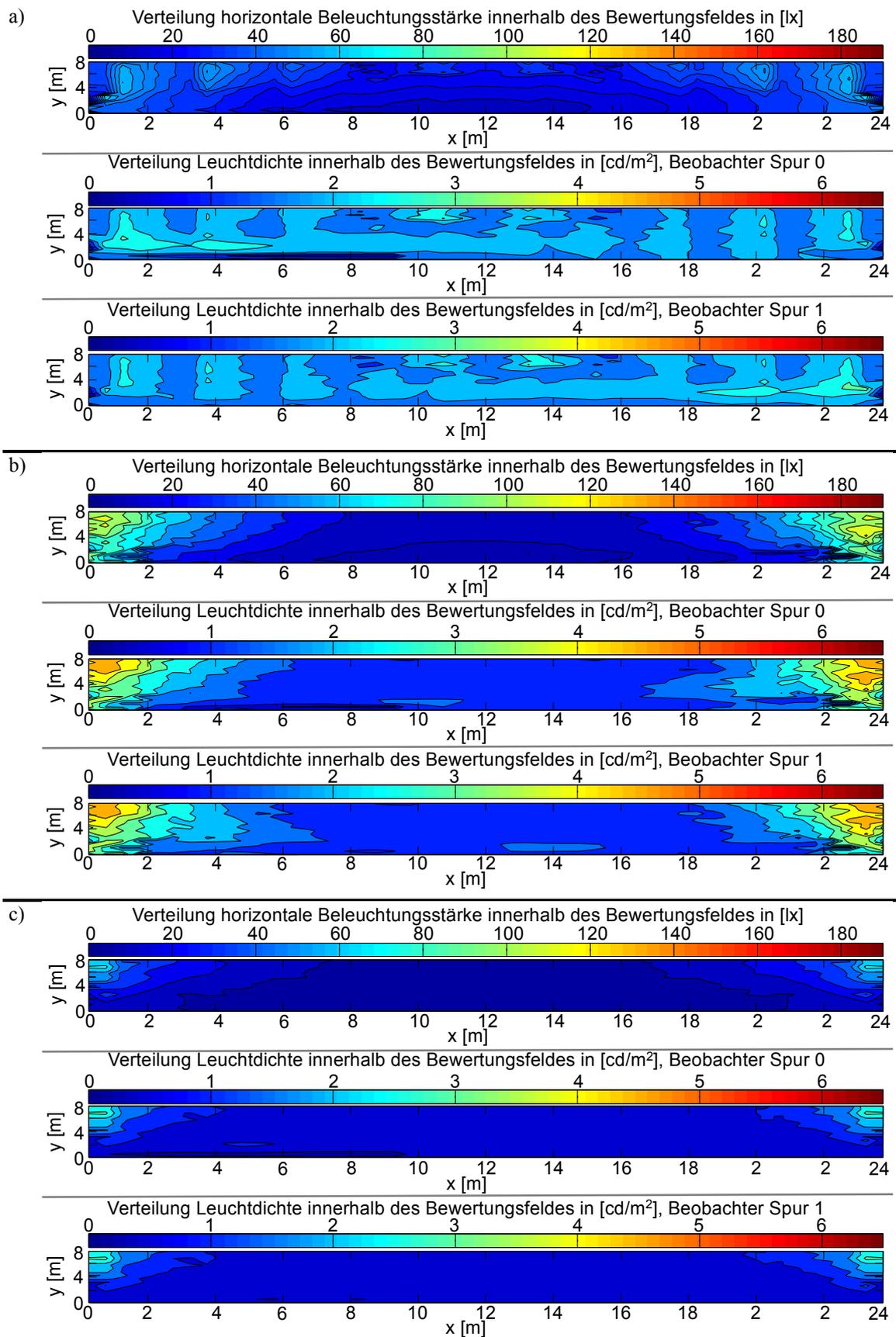


Abbildung 5.26: Aus der VL-Optimierung resultierende Lichtverteilungen für Sehojektreflexionsgrade a) 6,5 %, b) 20 % und c) 40 %, 24 m Mastabstand, R2-Fahrbahndeckschicht.

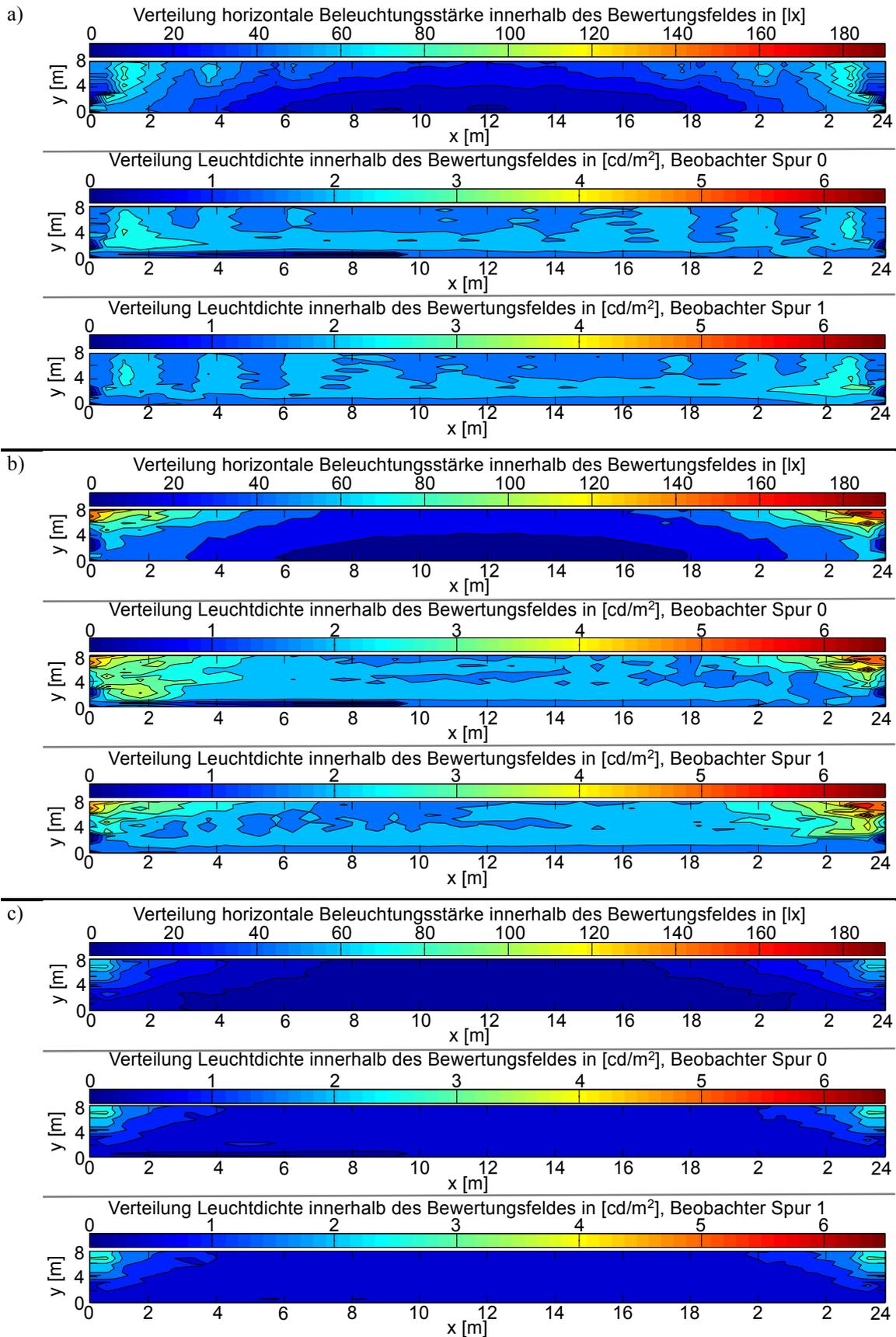


Abbildung 5.27: Aus der VL-Optimierung resultierende Lichtverteilungen für Sehhobjektreflexionsgrade a) 6,5 %, b) 20 % und c) 40 % bei 24 m Mastabstand, R3-Fahrbahndeckschicht.

5.3.3 RESULTIERENDE ERKENNBARKEITEN

5.3.3.1 EINFLUSS SEHOBJEKTRERFLEXIONSGRAD

Abbildung 5.28 zeigt die typische Abhängigkeit der VL-Optimierung vom Reflexionsgrad des Sehobjektes unter stationärem Beobachter, Abbildung 5.29 unter dynamischer Beobachtung. Deutlich zu erkennen ist die Verschiebung der VL-Werte mit Erhöhung des Reflexionsgrades vom negativen Wertebereich hin zum positiven. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der U_o -Optimierungen ist dieser Effekt bei der VL-Optimierung auf der den Leuchten abgewandten Seite nur leicht stärker ausgeprägt als auf der Zugewandten.

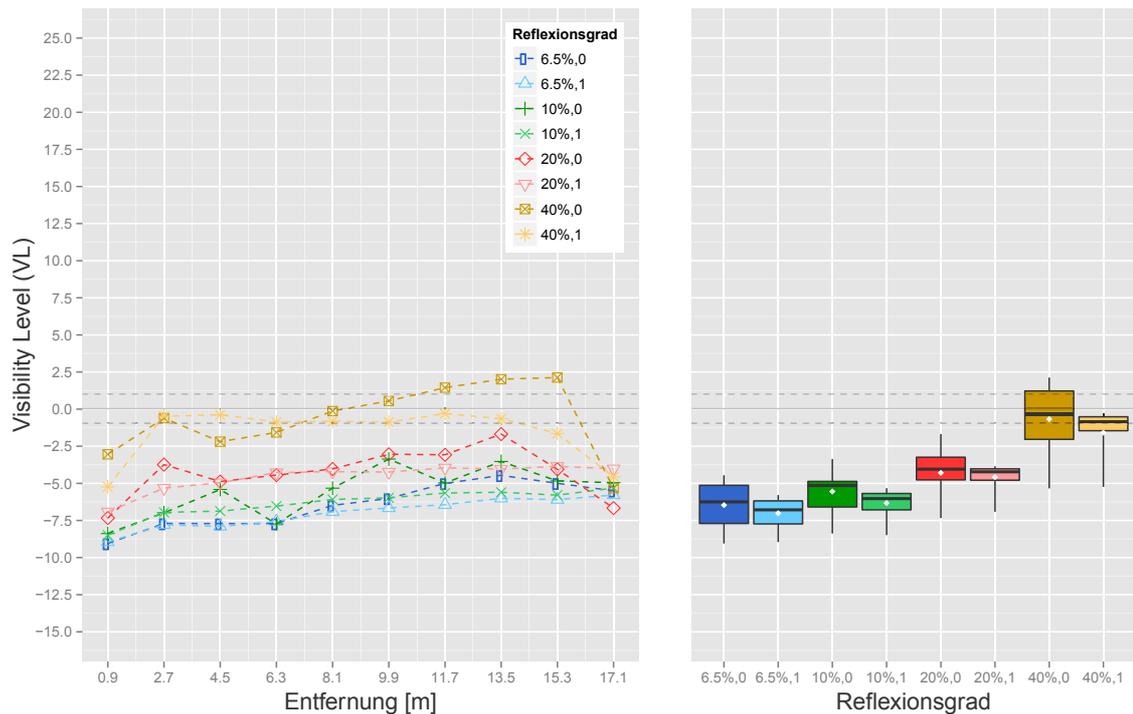


Abbildung 5.28: VL-Optimierung, statische Beobachtung, Deckschicht R2, Lichtpunktabstand 18 m, Variation des Sehobjektreflexionsgrades. Links VL-Verlauf; die Entfernung der Messpunkte bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes. Schwarz gestrichelt $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots Quartile, Minimum, Maximum, Median und Mittelwert (weißer Punkt).

Die Thematik wurde bereits in Unterkapitel 5.2.3 ausführlich für die U_o -Optimierungen diskutiert. Der Effekt tritt gleichermaßen bei stationärer und dynamischer Beobachtung auf. Über alle für die VL-Optimierung untersuchten Beleuchtungsszenen werden nach Abbildung 5.31 für die Reflexionsgrade $\rho_o = 6,5\%$, $\rho_o = 10\%$ und $\rho_o = 20\%$ Verläufe mit $|VL|_{\min}$ -Werten ohne Bereiche kritischer Erkennbarkeiten von $|VL| < 1$ erzielt. Die Verläufe der VL-Werte sind gleichmäßiger als bei denen der U_o -Optimierungen. Für Sehobjekte mit $\rho_o = 20\%$ liegt die Schwankungsbreite bei $|\Delta VL_{\min,\max}| < 6,5$, für $\rho_o = 40\%$ gilt $|\Delta VL_{\min,\max}| < 10$. Bei Betrachtung der in den Abbildungen 5.29 und 5.30 exemplarisch angeführten VL-Verläufe zeigt sich bereits bei qualitativem Vergleich der einzelnen Graphen, dass die Unterschiede der Verläufe nach Reflexionsgrad nicht vereinfacht durch einen faktoriellen Zusammenhang beschrieben werden können. Dies fällt bei den untersuchten Situationen der VL-Optimierung noch offensichtlicher auf als bei den gleichmäßigkeitsorientierten Optimierungen (Abschnitt 5.2.3).

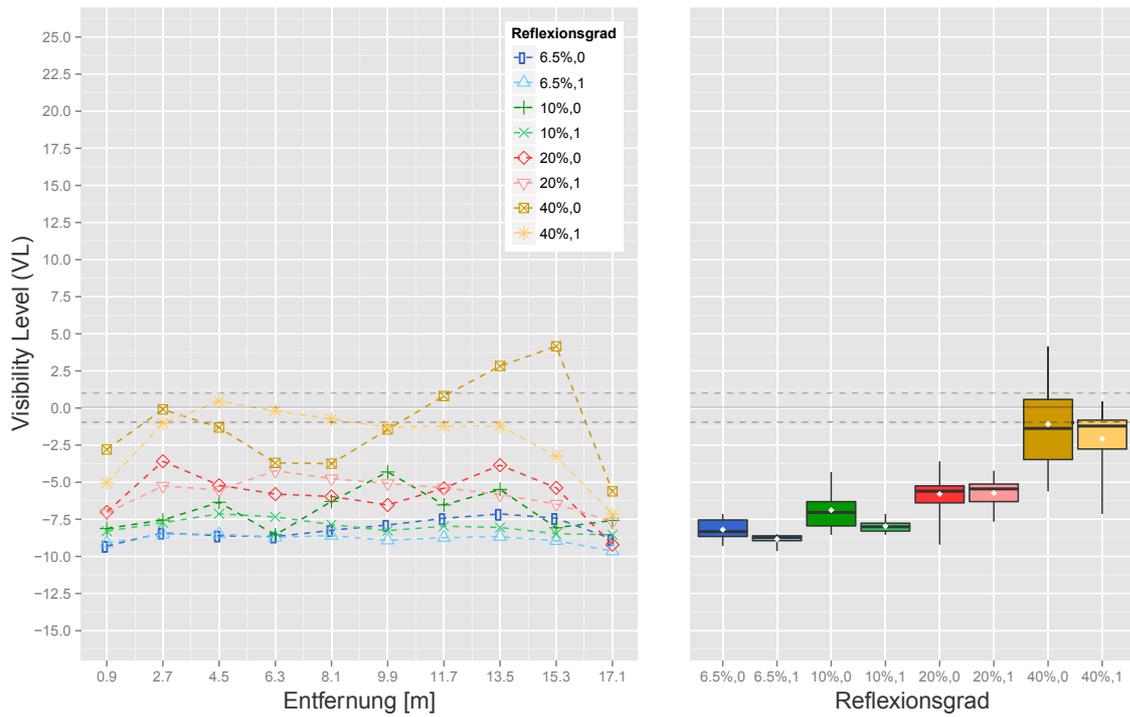


Abbildung 5.29: VL-Optimierung unter dynamischer Beobachtung, Deckschicht R2, Lichtpunktabstand 18 m, Variation des Sehobjektreflexionsgrades. Links VL-Verlauf entlang des Messfeldes, die Entfernung der Messpunkte bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes bei der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert den Bereich $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

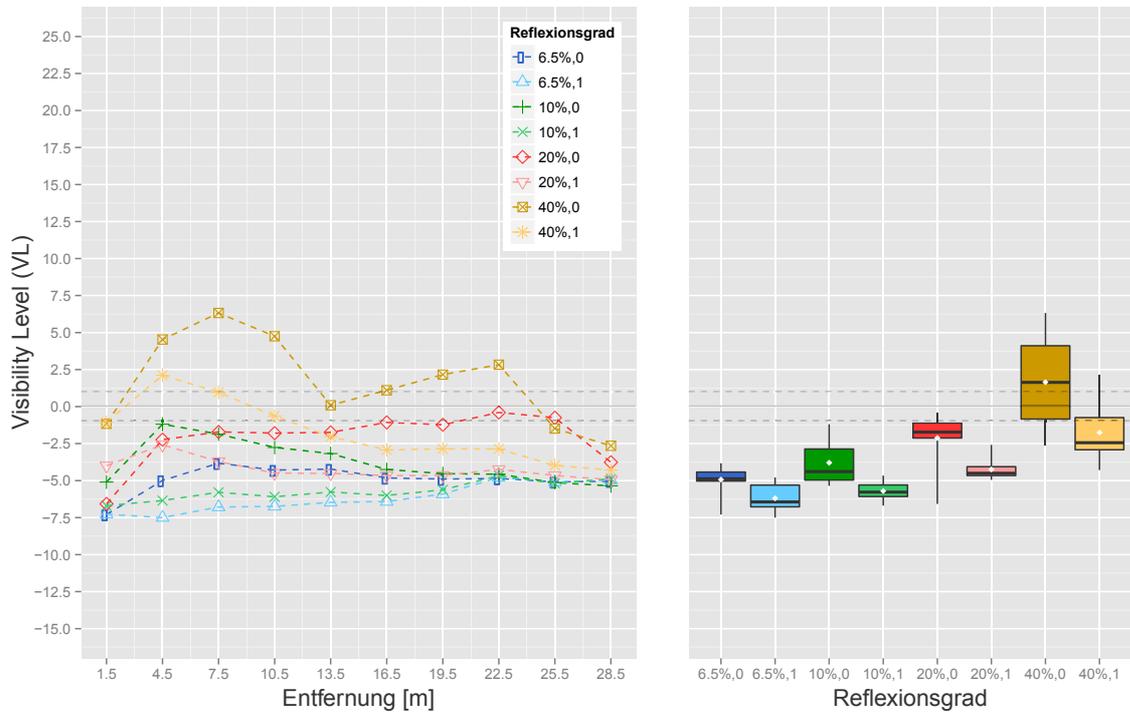


Abbildung 5.30: VL-Optimierung, stationäre Beobachtung, Deckschicht R3, Lichtpunktabstand 30 m, Layout entsprechend Abbildung 5.29.

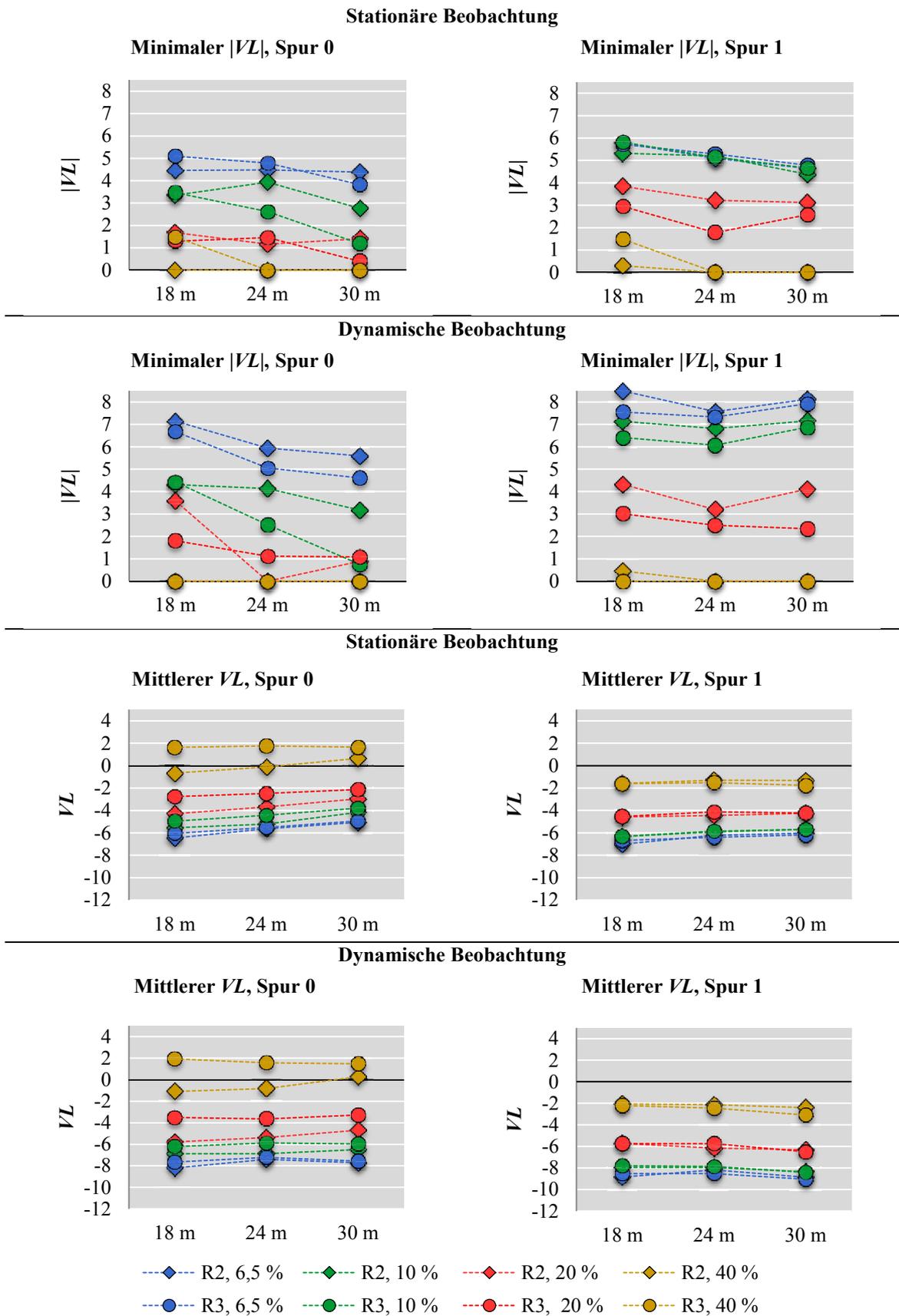


Abbildung 5.31: Übersicht minimale $|VL|$ und mittlere VL für stationäre und dynamische Beobachtung.

Einzig in der in Abbildung 5.30 angeführten Situation mit großem Mastabstand von $S_{\text{rel}} = 1/5$ stößt die Optimierung unter statischer Beobachtung an ihre Grenzen, so dass auf der Fahrspur Messpunkte im Falle des 20 %-Sehobjektes unter einer VL von 1 fallen. Bei der dynamischen Beobachtung treten kritische Werte zusätzlich bei $S_{\text{rel}} = 1/5$ und sonst gleichen Bedingungen auf (siehe Abbildung 5.32). Jedoch konnten auch mit der VL -Optimierung für $\rho_o = 40\%$ in keiner der untersuchten Beleuchtungsszenen Bereiche kritischer Erkennbarkeit vermieden werden. Dies unterstreicht die bereits in Abschnitt 5.2.3.3 getroffene Schlussfolgerung bezüglich der Arbeitshypothese U3-C aus Unterkapitel 3.3, wonach es für $\rho_o \geq 40\%$ keine akzeptablen Ergebnisse der VL -Verläufe bei Silhouette-basierten Beleuchtungen gibt.

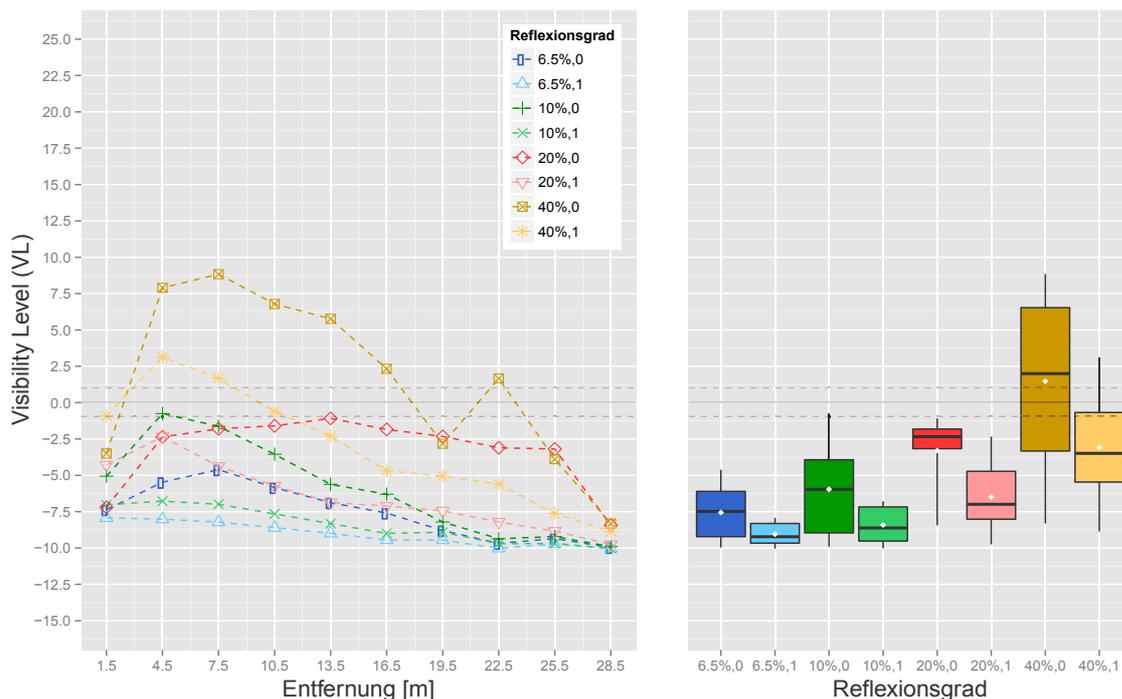


Abbildung 5.32: VL -Optimierung, dynamische Beobachtung, Deckschicht R3, Lichtpunktabstand 30 m. Links VL -Verlauf entlang des Messfeldes, die Entfernung der Messpunkte bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes bei der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert der Bereich $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

5.3.3.2 EINFLUSS FAHRBAHNDECKSCHICHT

Wie zu Beginn dieses Kapitels erläutert, wird die VL -Optimierung explizit für die Deckschichten R2 und R3 unter stationärer und dynamischer Beobachtung untersucht. Aus Abbildung 5.33 und Abbildung 5.34 sowie Abbildung 5.19 auf Seite 81 wird ersichtlich, wie gering sich die Änderung innerhalb der beiden untersuchten Fahrbahndeckschichten auf das Ergebnis der VL -Optimierung auswirkt. Innerhalb aller untersuchten Beleuchtungsszenen beträgt der Unterschied der $|VL|_{\text{min}}$ unter Variation der Deckschicht maximal 1,18. VL_{med} schwankt um $< 2,38$. Wie gleichmäßig die VL -Verläufe der VL -Optimierung insgesamt ausfallen, spiegelt der charakteristische Graph in Abbildung 5.33 wieder. Gleichmäßige VL -Kurven sind jedoch keine Garantie für durchgehend gute Erkennbarkeiten, wie Abbildung 5.34 zeigt. Dieses Beispiel ist die kritischste untersuchte Szene.

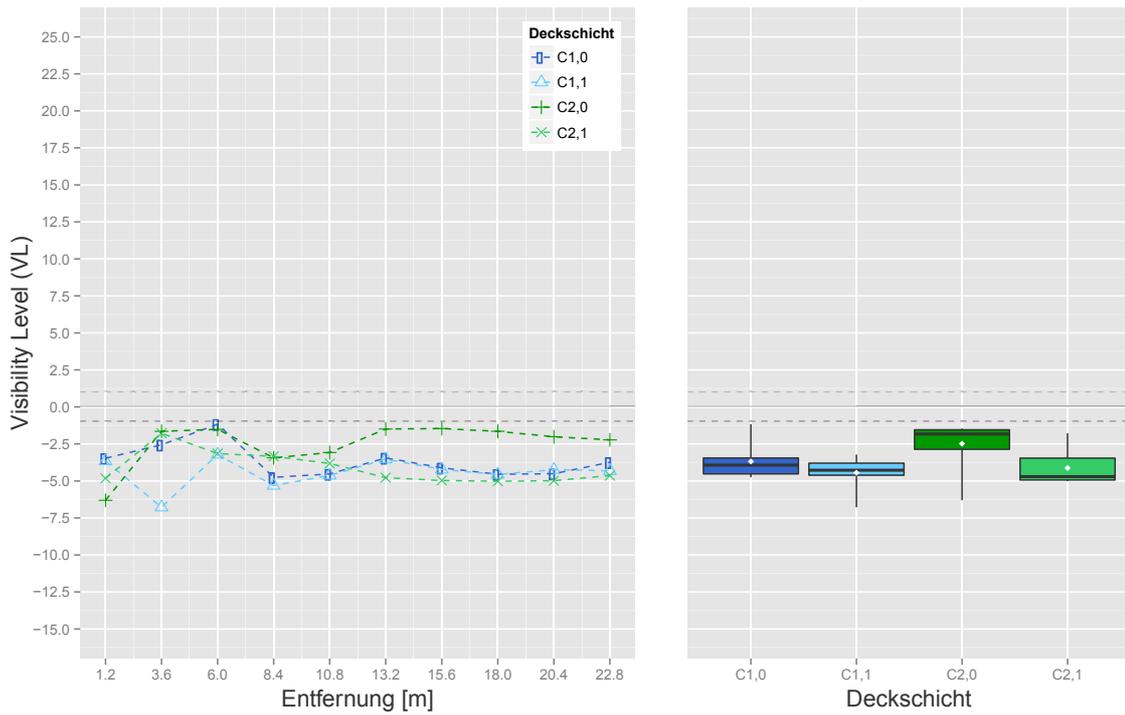


Abbildung 5.33: VL-Optimierung, Lichtpunktabstand 24 m, Sehöbjektreflexionsgrad 20 %. Links VL-Verlauf entlang des Messfeldes, die Entfernung des jeweiligen Messpunktes bezieht sich auf den Beginn des Messfeldes auf Höhe der dem Beobachter nähergelegenen Leuchte. Schwarz gestrichelt markiert der Bereich $|VL| \leq 1$. Rechts Boxplots der links angeführten VL-Verläufe, jeweils C-Deckschicht für Fahrspur 0 und Fahrspur 1, Box der zwei inneren Quartile, Minimum, Maximum, Median (schwarzer Balken) und Mittelwert (weißer Punkt).

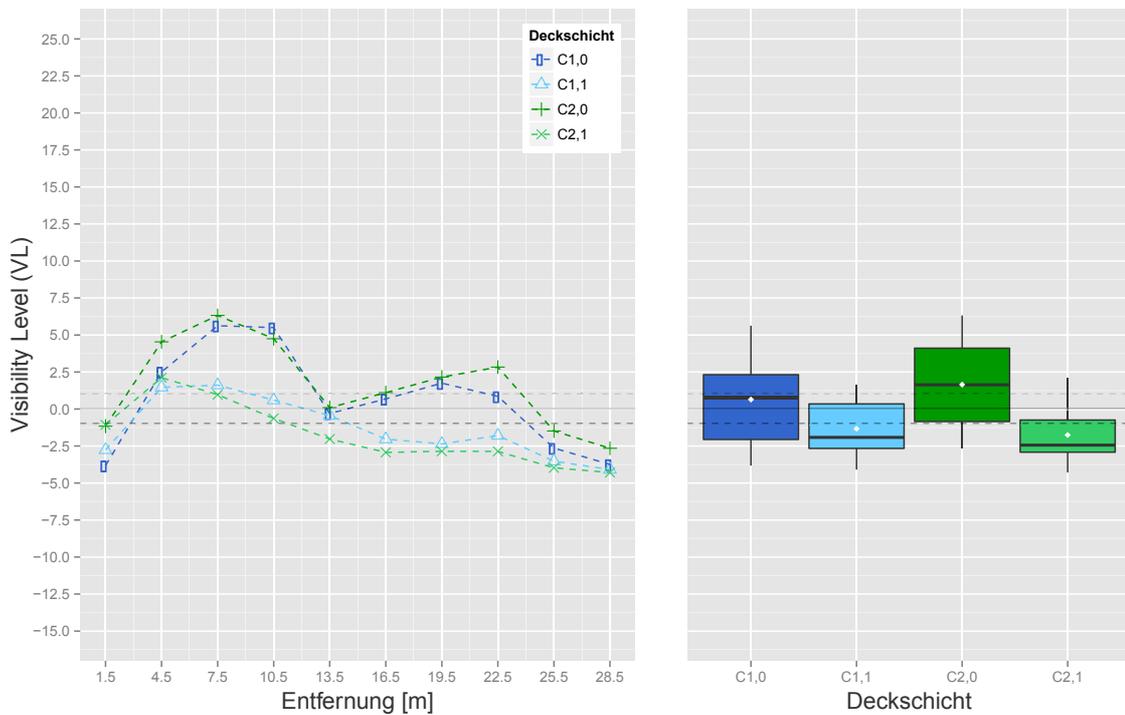


Abbildung 5.34: VL-Optimierung, Lichtpunktabstand 30 m, Sehöbjektreflexionsgrad 40 %, Layout entsprechend Abbildung 5.33.

5.3.3.3 EINFLUSS LICHPUNKTABSTAND

Nach Abbildung 5.31 führt eine Vergrößerung des Lichtpunktabstandes (außer beim 20 %-Sehobjekt) in Kombination mit R2-Deckschicht in allen Fällen der stationären Beobachtung zu einer Verschlechterung des $|VL|$ -Minimums. Unter dynamischer Beobachtung gilt dies auch für das 10 %- und das 6,5 %-Sehobjekt. Dies liegt daran, dass vor allem unter stationärer Beobachtung die VL -Verläufe ins Positive verschoben werden, was beim Silhouette-Prinzip zu einer Verringerung der VL führt. Dies bedingt einerseits der kleiner werdende Sehobjekt-Sehwinkel. Andererseits liegt die Ursache auch darin, dass die LVK der VL -Optimierung ursprünglich für die dynamische Beobachtung dimensioniert worden sind. Unter dieser Beobachtungsart verschlechtern sich lediglich 3 von 16 VL -Verläufen anhand des mittleren VL . Eine eindeutige Verschlechterung der $|VL|$ -Minima bei einer Vergrößerung des Lichtpunktabstandes ist in 6 von 10 Fällen festzustellen.

Tabelle A.21 des Anhangs gibt eine Übersicht der VL -Kennzahlen hinsichtlich des Einflusses des Mastabstandes. Der maximale Abfall von $|VL|_{\min}$ zeigt sich unter stationärer Beobachtung bei Vergrößerung des S_{rel} von $1/3$ auf $1/5$ im Falle des 10 %-Sehobjektes auf R3-Deckschicht. Hier beträgt $\Delta|VL|_{\min} = 2,28$ auf Fahrspur 0. In den meisten Fällen liegt $\Delta|VL|_{\min}$ jedoch unter 1. Unter dynamischer Beobachtung bleibt mit wenigen Ausnahmen bei $\Delta|VL|_{\min} < 2$.

5.3.4 ZUSAMMENFASSUNG

Die VL -Optimierung muss zur Minimierung des Effektes von Kontrastumkehrungen vorweg auf Positiv- oder Negativkontrastoptimierung festgelegt werden. Da es bei den in dieser Arbeit betrachteten niedrigen Beleuchtungsniveaus der ortsfesten Straßenbeleuchtung unter der Präferenz eines möglichst niedrigen Lichtstrombedarfs je Lichtpunkt wesentlich einfacher ist, negative Sehobjektkontraste zu realisieren als positive, handelt es sich bei den Ergebnissen der VL -Optimierungen ausschließlich um Optimierungen nach dem Silhouette-Prinzip. Die resultierenden Lichtverteilungen auf der Fahrbahn ähneln den Ergebnissen leuchtdichteoptimierter LVKs mit verstärkten horizontalen Beleuchtungsstärken zu den Lichtpunkten der gegenüberliegenden Fahrbahnseite. So werden besonders die quer zur Fahrbahn verlaufenden Ausstrahlrichtungen der LVK betont. Die Anteile längs der Fahrbahn sind verringert, um die dem Silhouette-Prinzip entgegenwirkenden Abstrahlungen der Objekte zu minimieren. Dennoch erreichen die Leuchtdichteverteilungen der VL -Optimierungen Gleichmäßigkeiten, die nach gängigen Leuchtdichtebewertungsverfahren als gut gewertet werden können (vgl. Tabelle 5.1).

Wie in 5.2.3.1 zu den U_o -Optimierungen diskutiert, stellt das kritische Sehobjekt mit $\rho_o = 40\%$ die größte Herausforderung dar. So kann die VL -Optimierung, unabhängig von der Beobachtungsform, in keiner Situation akzeptable Erkennbarkeiten $|VL| \geq 1$ flächendeckend für diesen Reflexionsgrad bereitstellen. Die Performanz mit typischem $\rho_o = 20\%$ -Sehobjekt ist dahingegen wesentlich besser und bei niedrigeren Reflexionsgraden unkritisch. Unter dynamischer Beobachtung treten lediglich bei der R2-Deckschicht bei 24 m und 30 m Minimalwerte im kritischen Bereich auf (vgl. Abbildung 5.31), unter stationärer Beobachtung ausschließlich bei großem Mastabstand von 30 m ($S_{\text{rel}} = 1/5$).

Im Vergleich zu den U_o -Optimierungen stellt die VL -Optimierung nicht die besten Erkennbarkeitsverläufe bereit, vermeidet jedoch wirkungsvoller als alle anderen untersuchten Optimierungen Kontrastverflachungen, welche zu niedrigen $|VL| < 1$ führen und die Nichterkennbarkeit von Objekten bewirken können (vgl. Abbildung 5.16, Seite 77 und Abbildung 5.31, Seite 93). Dies resultiert aus dem Einfluss der gesetzten Randbedingungen wie der Minimierung der Blendung oder des Lichtstroms.

5.4 KENNZAHLENSYSTEME

5.4.1 VERGLEICH DER VL -VERLÄUFE MIT DER $STVL$ -METHODE

In diesem Kapitel wird die auf der VL -Methode aufbauende Small Target Visibility (STV)-Methode nach [IESNA 2005] zum Vergleich herangezogen. Sie wurde in Kapitel 2.2.4.12 vorgestellt und ist in Kombination aus Leuchtdichteniveau und -Gleichmäßigkeit als Qualitätskennzahl in der Straßenbeleuchtung etabliert. Die empfohlenen Vorgaben für die untersuchten Beleuchtungsniveaus sind als Mindestwerte des $STVL$ in ANSI / IESNA RP-8-00 [IESNA 2005] gegeben. Abbildung 5.35 illustriert die erzielten $STVL$ nach Sehobjektreflexionsgrad.

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 5.2 gegebenen Anforderungen fasst Tabelle 5.3 die Ergebnisse der $STVL$ -Werte unter dynamischer Beobachtung, entsprechend farblich hinterlegt, zusammen. Die Tabellen A.22 und A.23 des Anhangs geben eine Übersicht über die erzielten $STVL$ -Level bei stationärer Beobachtung.

Tabelle 5.2: STV -Vorgaben für die untersuchten Straßenkategorien nach ANSI IESNA RP-8-00.

Straßenkategorie	Konfliktniveau	STV -Vorgabe
Sammelstraße	hoch	3,8
	normal	3,2
	niedrig	2,7
Anwohnerstraße	hoch	2,7

Aus den Ergebnissen der Kapitel 5.2 und 5.3 geht hervor, dass bis auf die $U_o(E_{hor})$ -Optimierung alle Optimierungen deutlich zu Kontrastverläufen nach dem Silhouette-Prinzip neigen. Der größte berücksichtigte Sehobjektreflexionsgrad beträgt im Rahmen der vorliegenden Untersuchung $\rho_o = 40\%$. Für Negativkontraste gilt nach Kapitel 5.3.3, dass Objekte mit niedrigerem Reflexionsgrad unter sonst gleichen Bedingungen einen mindestens gleich großen, eher jedoch einen größeren VL -Betrag je Messpunkt aufweisen und umgekehrt. Die $STVL$ -Bewertung nach RP-8-00 verwendet ein $\rho_o = 50\%$ -Sehobjekt. Sofern also die $\rho_o = 40\%$ -Sehobjekte der STV -Tabellen die Anforderungen nach RP-8-00 nicht erfüllen und gleichzeitig das Silhouette-Prinzip gilt, ist fraglich, ob bei einem $\rho_o = 50\%$ -Sehobjekt die Anforderungen erfüllt würden.

Es kann daher gefolgert werden, dass unter dynamischer Beobachtung die aus der Leuchtdichteoptimierung resultierenden Verteilungen nach der dafür vorgesehenen $STVL$ -Bewertung keine die $STVL$ -Vorgabe von 3,8 erreicht. Jeweils ein Drittel erreichen zumindest die Vorgaben 3,2 und 2,7. Ein weiteres Drittel erfüllt keine einzige Vorgabe, obwohl Leuchtdichteniveau- und Gleichmäßigkeitsanforderungen nach RP-8-00 weit übertroffen werden.

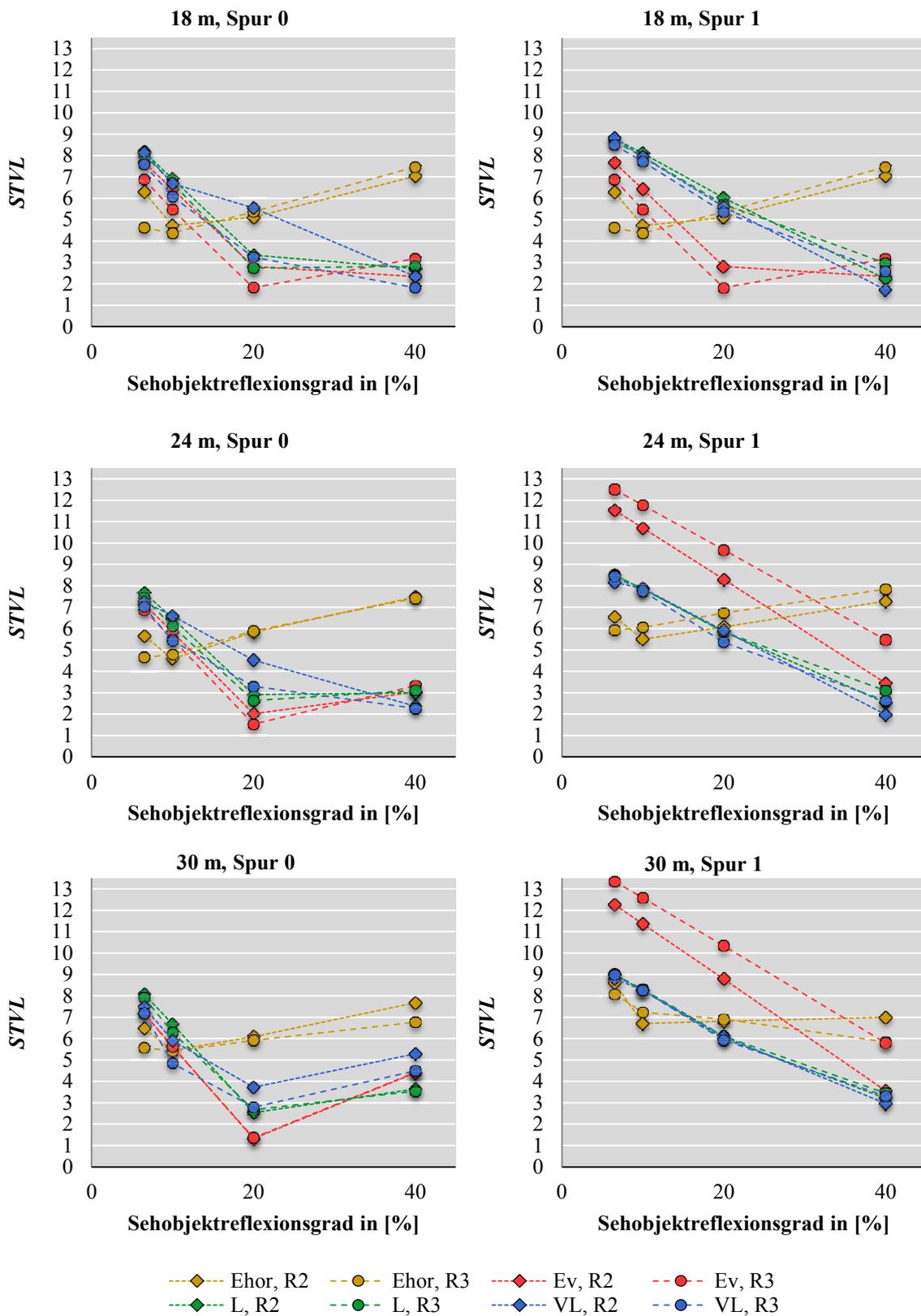


Abbildung 5.35: Abhängigkeit des STVL vom Reflexionsgrad des Sehobjektes, dynamische Beobachtung.

Tabelle 5.3: Übersicht der STV-Werte, dynamische Beobachtung.

Fahrspur 0												
Eh	18m				24m				30m			
STV Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	6,29	4,73	5,11	7,03	5,66	4,59	5,83	7,48	6,48	5,45	6,09	7,67
R3	4,62	4,37	5,37	7,46	4,65	4,79	5,89	7,42	5,59	5,41	5,92	6,77
Ev	18m				24m				30m			
STV Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	7,67	6,43	2,81	2,34	7,15	5,83	2,02	3,03	7,17	5,64	1,33	4,39
R3	6,88	5,47	1,82	3,17	6,87	5,50	1,53	3,33	7,16	5,62	1,36	4,42
L	18m				24m				30m			
STV Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	8,18	6,91	3,34	2,71	7,68	6,48	2,91	3,00	8,08	6,68	2,54	3,64
R3	8,04	6,71	2,74	2,83	7,44	6,11	2,63	3,11	7,92	6,29	2,67	3,54
VL	18m				24m				30m			
STV Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	8,14	6,69	5,55	2,35	7,25	6,59	4,52	2,37	7,49	5,90	3,72	5,29
R3	7,59	6,08	3,25	1,82	7,02	5,43	3,30	2,27	7,19	4,84	2,79	4,49
Fahrspur 1												
Eh	18m				24m				30m			
STV Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	6,23	5,02	5,83	7,4	6,55	5,51	6,08	7,28	8,61	6,70	6,81	6,99
R3	5,13	5,24	6,40	8,05	5,93	6,05	6,73	7,84	8,08	7,23	6,91	5,84
Ev	18m				24m				30m			
STV Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	11,37	10,41	7,67	2,15	11,54	10,7	8,3	3,45	12,26	11,36	8,79	3,56
R3	11,83	10,92	8,27	3,09	12,50	11,77	9,68	5,47	13,35	12,58	10,34	5,80
L	18m				24m				30m			
STV Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	8,80	8,11	6,03	2,24	8,50	7,84	5,86	2,53	9,00	8,26	6,00	3,22
R3	8,66	7,95	5,72	2,97	8,50	7,86	5,85	3,10	9,00	8,30	6,11	3,45
VL	18m				24m				30m			
STV Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	8,82	7,94	5,61	1,72	8,16	7,88	5,91	1,98	8,8	8,25	6,10	2,96
R3	8,50	7,72	5,35	2,59	8,45	7,75	5,36	2,62	8,98	8,25	5,93	3,31



Die Ergebnisse der $U_o(E_{hor})$ -Optimierung, welche in den Kapiteln 5.2 und 5.3 wegen ihrer Kontrastumkehrungen negativ auffallen und teils größere Bereiche kritischer VL-Werte aufweisen, erzielen nach der STVL-Bewertung, sowohl unter dynamischer als auch stationärer Beobachtung, hervorragende Ergebnisse, teils weit über $STVL = 3,8$ hinaus und ohne auch nur einen kritischen STVL-Wert. Diese Ergebnisse werden erzielt, obwohl horizontale Beleuchtungsstärke und leuchtdichtebasierte STVL-Bewertung aufgrund des fehlenden direkten geometrischen und lichttechnischen Zusammenhangs in den Standards zu Recht nicht zusammenhängend betrachtet werden. Alle anderen Optimierungen, die nach 5.2 und 5.3 gute Ergebnisse erzielen, haben nach STVL-Bewertung durchgehend mäßige Ergebnisse von $STVL < 3,8$ je Szene (beide Fahrspuren), unabhängig von der Art der Beobachtung.

Entsprechend dem Leuchtdichteniveau und der hohen Gleichmäßigkeit sollte mindestens die Leuchtdichte-Optimierung alle *STVL*-Anforderungen erfüllen. Ebenso sollte auch die *VL*-Optimierung gute Ergebnisse erzielen. Beide Varianten kommen jedoch bereits beim $\rho_o = 40\%$ -Objekt an die Grenzen ihrer Möglichkeiten. Die Ergebnisse im Falle des $\rho_o = 50\%$ -Objektes könnten dementsprechend schlechter ausfallen.

Auch wenn eine Wichtung von \overline{VL} und eine Kompensation der Kontrastpolarität vorgenommen wird, zeigt der *STVL*, wie verfälschend die Zusammenfassung einer örtlichen Verteilung von Werten zu einem einzelnen Gesamtwert wirkt.

5.4.2 SEPARATE BEWERTUNG DER BLENDUNG MITTELS *TI*

Der Fokus dieses Abschnitts liegt auf den Auswirkungen der in den Optimierungen implementierten Randbedingung zur Vermeidung von Blendung. Eine vergleichende Blendungsbetrachtung kann für die $U_o(E_{hor})$ -Optimierung vernachlässigt werden, da das ihr zugrunde liegende Beleuchtungsprinzip nach Abbildung 5.8 in Kapitel 5.2.3 flache Abstrahlwinkel so stark begrenzt, dass die *TI*-Werte deutlich unter 15^{16} liegen. Die $U_o(E_{ver})$ -Optimierung verfügt zum Zeitpunkt der Simulationen über keine gesonderte Randbedingung. Bei der $U_o(L)$ -Optimierung ist der *TI*-Begrenzung eine niedrigere Priorität zugewiesen, als dem jeweiligen eigentlichen Optimierungsziel. Sofern also keine Lösung innerhalb der *TI*-Begrenzung möglich ist, wird eine Überschreitung derer in Kauf genommen, um überhaupt eine Lösung in Form einer LVK bereitstellen zu können. Die *VL*-Optimierung basiert auf den ursprünglichen Ansätzen nach ADRIAN [1969] und der Weiterentwicklung dieser entsprechend Abschnitt 2.2.4 und Unterkapitel 4.4. Um darzustellen, wie sich dieser Ansatz auf die Blendung auswirkt, wird der *TI*-Wert auch für die *VL*-Optimierung bestimmt. Abbildung 5.36 gibt eine Übersicht der erzielten *TI*-Werte der drei Optimierungsvarianten.

Die fehlende Blendungsbegrenzung der $U_o(E_{ver})$ -Optimierung führt dazu, dass die *TI*-Werte bei einer Erhöhung des Mastabstandes drastisch ansteigen. Bei einer Erhöhung des Mastabstandes von $S_{rel} = 1/3$ (18 m) auf $S_{rel} = 1/5$ (30 m) wird der *TI* von im Mittel 26,3 % auf im Mittel 54,7 % mehr als verdoppelt. So werden bereits bei $S_{rel} = 1/3$ (18 m) Lichtpunktabstand $TI > 20\%$ verursacht, bei $S_{rel} = 1/4$ (24 m) Lichtpunktabstand $TI > 35\%$ und bei 40 m $TI > 50\%$.

Auch bei der $U_o(L)$ -Optimierung steigt bei der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten einreihigen Lichtpunktanordnung der *TI* mit größerem Mastabstand. Die implementierte *TI*-Randbedingung wirkt jedoch diesem Effekt entgegen. Bei 30 m Mastabstand kann sie kaum noch eine gültige Lösung für eine LVK bereitstellen, so dass sie abbricht. Daraus resultiert, dass in 3 von 6 Fällen der gesetzte maximale *TI* von 15 % überschritten wird. Dieser Effekt ist in Abbildung 5.36, oben rechts, gut zu erkennen und zeigt, dass bis zu einem $S_{rel} = 1/4$ (Mastabstand = 24 m) Beleuchtungen bei niedrigen Leuchtdichteniveaus von 0,7 bis 1,0 cd/m^2 realisiert werden können, welche akzeptable Blendwirkung bereitstellen. Für größere Mastabstände kann keine akzeptable Blendwirkung nach Bewertung mittels *TI* garantiert werden, wenn eine Optimierung unter der Prämisse einer gleichmäßigen Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahn vorgenommen wird.

¹⁶ Die *TI*-Begrenzung von *TI* kleiner 15 wurde in den Unterkapiteln 3.2 und 4.5 eingeführt und dient der Vermeidung erhöhter Blendbeleuchtungsstärken am Auge des Beobachters.

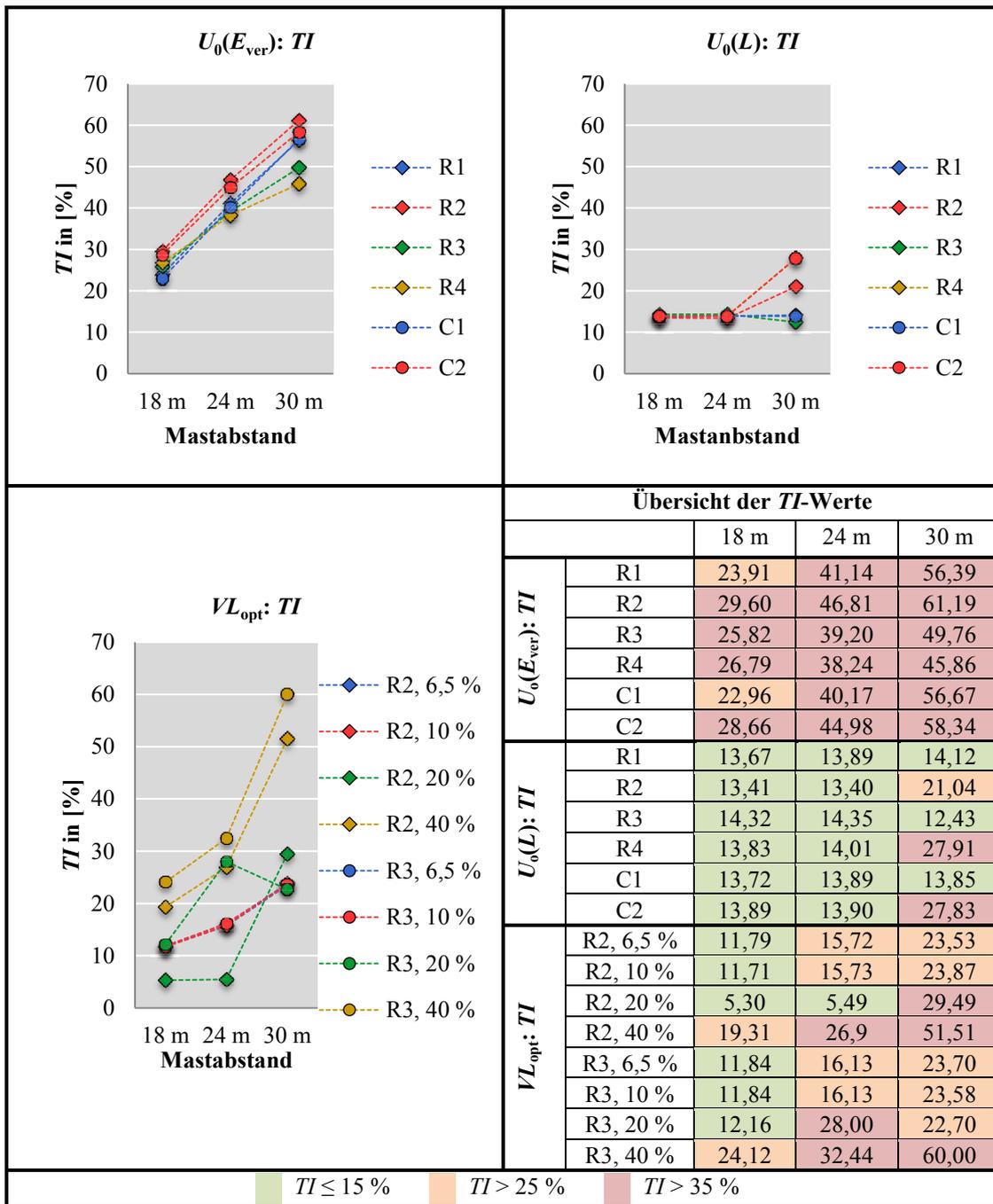


Abbildung 5.36: Übersicht der resultierenden Schwellenwerterhöhungswerte TI für die untersuchten Beleuchtungsszenen.

Obwohl die Adaptation bei der Bestimmung der Kontrastschwelle im Falle der VL-Bewertung und Optimierung berücksichtigt wird, treten bei diesem Optimierungsweg recht schnell erhöhte TI-Werte auf. Die unterschiedlichen Ergebnisse von VL- und TI-Bewertung zur Qualität von Straßenbeleuchtungsinstallationen werden im Vergleich in Kapitel 8 kritisch diskutiert.

5.5 MINIMIERUNG DES LICHTSTROMES

Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Vermeidung kleiner VL -Werte als Ziel einer Optimierung des Lichtstärkeverteilungskörpers gegenüber den anderen angewandten Optimierungen kein wesentlicher Vorteil hinsichtlich Einsparung des Lichtstromes und somit des Energiebedarfes erzielt wird. Die Ergebnisse liegen je nach Reflexionscharakteristik der Deckschicht leicht über dem Niveau der Optimierung auf eine gleichmäßige Verteilung der Leuchtdichte. Eine genaue Übersicht gibt Abbildung 5.37. Hier werden sowohl die einzelnen Lichtströme als auch eine graphische Aufbereitung wiedergegeben. Der Lichtstrombedarf nimmt unter sonst konstanten Bedingungen bei der Leuchtdichte- wie auch den beiden Beleuchtungsstärkeoptimierungen mit steigendem Mastabstand nahezu linear zu. Für die VL -Optimierungen gilt dies nicht zwingend.

Abbildung 5.37 zeigt die Abhängigkeit der benötigten Lichtströme je Lichtpunkt bei gleicher Lichtpunktanzahl je Bewertungsfeld in Abhängigkeit von der Diffusität der Deckschicht, hervorgehoben nach eher diffus und eher nicht diffus reflektierend. Auffällig hierbei ist, dass eher diffuse Deckschichten der Klassen R1, R2, und C1 niedrigere Lichtströme erfordern als weniger diffus reflektierende wie die R3-, R4-, und C2- Standardarten.

Tabelle A.31 des Anhangs gibt ergänzend Vergleichswerte der Optimierungsmethoden für das Beleuchtungsniveau bei vergleichbarem \overline{VL} wieder. Die Vorgaben für diese VL -Optimierung sind eine mittlere Leuchtdichte von $0,75 \text{ cd/m}^2$ bzw. eine mittlere horizontale Beleuchtungsstärke von 10 lx . Diese unterschieden sich bei vergleichbarem \overline{VL} in fast allen Fällen kaum.

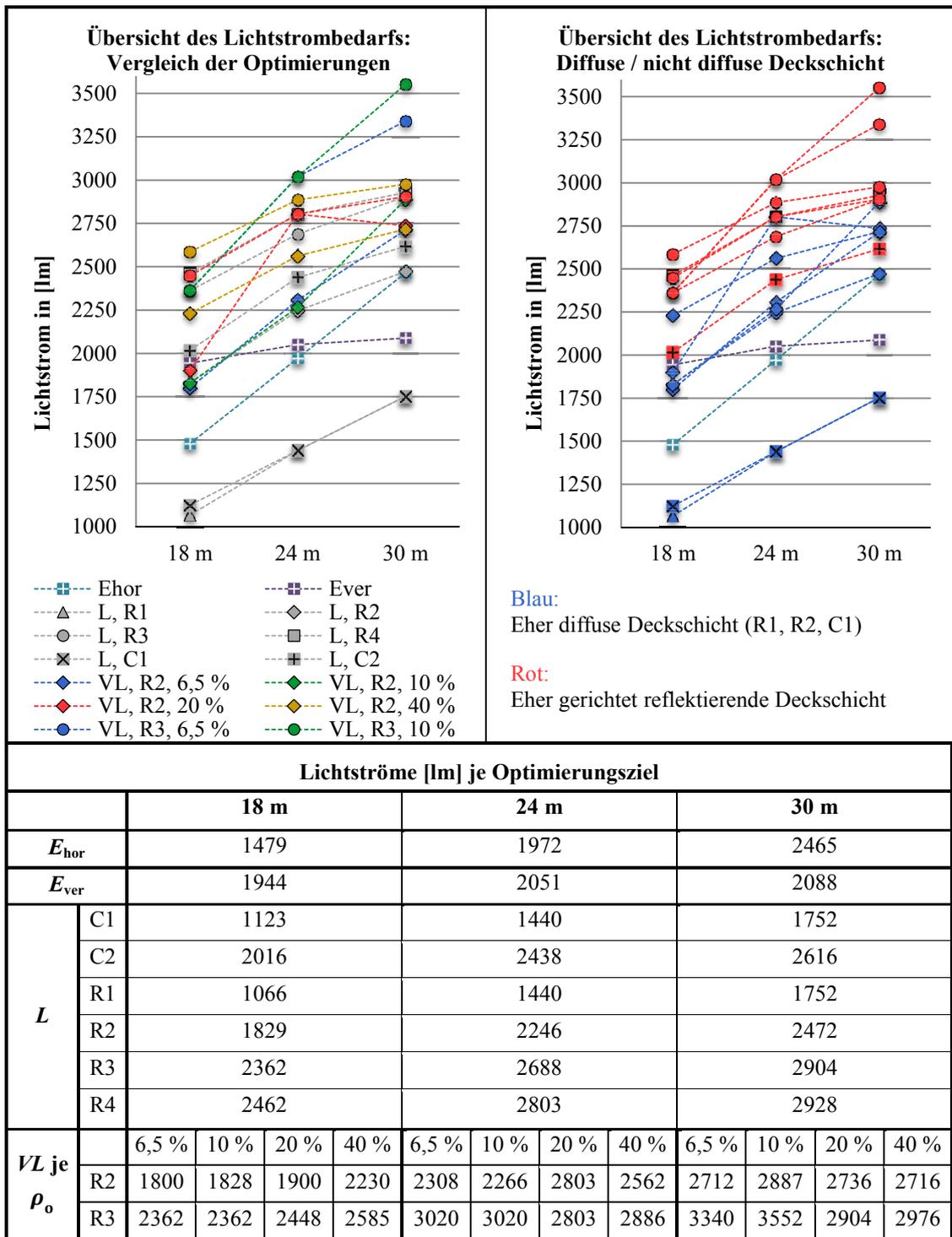


Abbildung 5.37: Übersicht des benötigten Lichtstromes zum Erreichen des vorgegebenen Beleuchtungsniveaus. Oben links nach Optimierungsart, oben rechts nach Tendenz der Deckschichtreflexionscharakteristik und unten in tabellarischer Form.

6

VERIFIKATION IM LABORVERSUCH

Im Kapitel 5 wurden die Wirkungen von optimierten Lichtverteilungen ausschließlich in der Simulationsumgebung betrachtet. Um zu prüfen, wie gut sich optimierte LVK praktisch realisieren lassen, wurden im Laborversuch exemplarisch optimierte LVK erzeugt. Die so realisierten Lichtverteilungen wurden gemessen, bewertet und mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Die LVK werden für die Installationsgeometrien entsprechend der vier vorgestellten Optimierungsziele berechnet und mit adaptiven LED-Leuchten nachgestellt, deren LVK manuell anpassbar ist. Die so praktisch realisierten Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteverteilungen werden mit ihren Äquivalenten aus der Simulation verglichen und auf die bereitgestellten lichttechnischen Kennzahlen und Erkennbarkeiten hin untersucht.

Entsprechend der in der Operationalisierung in Unterkapitel 3.4 festgelegten Maßnahmen und Ausprägungen gibt Tabelle 6.1 eine Übersicht über den Variationsumfang des Laborversuchs.

Tabelle 6.1: Untersuchte Maßnahmen (unabhängige Variablen) und deren Variationsumfang.

Maßnahme	Ausprägungen der Maßnahme
Optimierungsziel	$U_{0,Ehor} \rightarrow \max$
	$U_{0,Ever} \rightarrow \max$
	$U_{0,L} \rightarrow \max$
	$ VL _i \rightarrow \max$
Lichtpunktabstand	$S_{rel} = 1/3: \quad 8,1 \text{ m}$
	$S_{rel} = 1/4: \quad 10,8 \text{ m}$
	$S_{rel} = 1/5: \quad 13,5 \text{ m}$
Reflexionsgrad des Sehobjektes	6,5 %; 20%; 40%

Die Nachstellungen der LVK und Durchführung der Messungen erfolgte im Rahmen der studentischen Abschlussarbeiten von SCHEIBLER [2013], JOCKISCH [2013] und FRAUENHOFER [2015].

6.1 VERSUCHSSETUP

Die berechneten LVK werden mit zwei LED-Leuchten nachgestellt, welche in der C0-C180-Ebene längs der Fahrbahn (des Messfeldes) verstellbar sind. Die Optimierung erfolgt daher explizit in dieser Achse der Fahrbahn. Jede der beiden Leuchten kann durch Ausrichtung und DMX-gesteuerte Dimmung aller 16 Einzelmodule (vgl. Abbildung A.3) in der C0-C180-Ebene frei konfiguriert werden. Das Konfigurationssetup erfolgt mit einem speziell für die adaptiven

Leuchten programmierten Konfigurator. Dieser ist eine, in Kooperation mit *Evermind GmbH* und *CARALUX LED und Neonlicht GmbH*, entwickelte Planungssoftware¹⁷. Er bietet die Möglichkeit einen Gesamt-Lichtstärkeverteilungskörper als Summe der LVK einzelner LED-Module durch den Import ihrer jeweiligen .ldt- oder .ies-Dateien innerhalb der konstruktionsbedingten Einschränkungen der Leuchte zusammenzustellen. Abbildung A.4 des Anhangs zeigt die Benutzeroberfläche der Software [SCHADE & VÖLKER 2013; SCHEIBLER 2013].

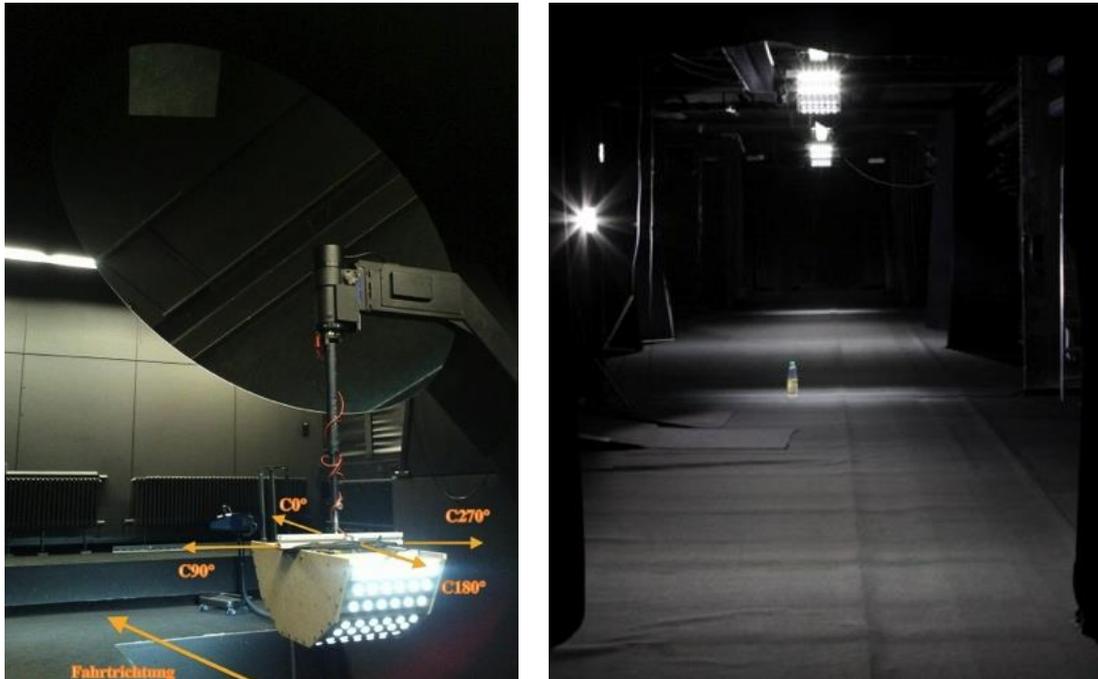


Abbildung 6.1: Adaptive LED-Leuchte mit C-Ebenen (links) [Scheibler 2013], Anbringung an Photometerbahn (rechts).

Die im Leuchtenkonfigurator erstellte LVK wird in die adaptive LED-Leuchte überführt und folgend als Nachstellung bezeichnet. Die ausführliche Diskussion der Unsicherheiten bei der Konfiguration der LED-Leuchte folgt in Kapitel 7.3.

Abbildung 6.2 gibt eine schematische Übersicht über den Laboraufbau aus der Aufsicht. Der gesamte Aufbau ist durch das begrenzte Raumangebot des Laborraumes von 55,00 m Länge, 7,00 m Breite und 3,40 m Höhe eingeschränkt und wird maßstabsgetreu im Verhältnis 1 : 2 zu typischen realen Installations- und Messgeometrien im Feld wie in den Abschnitten 3.2.3 bis 3.2.5 dimensioniert. Die maximal mögliche Lichtpunkthöhe im Laborraum beträgt $H = 2,70$ m. Die Breite des Mess- und Bewertungsfeldes (Abbildung 6.2 rosa Feld) beträgt $W_L = 2,70$ m. Die Auswirkungen der niedrigen Lichtpunkthöhe werden in Unterkapitel 7.3 der Unsicherheitsbetrachtung diskutiert. Die Leuchten sind zur exakten Variation des Lichtpunktabstandes und präzisen manuellen Ausrichtung an einer Photometerbahn unter der Decke des Raumes fixiert. Dies bedingt, dass die Leuchten in Querrichtung mittig zum Bewertungsfeld in der vertikalen Beobachtungsebene liegen. Der Beobachtungsabstand zur Bestimmung der Leuchtdichte-

¹⁷ Die Entwicklung des Konfigurators wurde im Rahmen des Projektes „Entwicklung und Validierung technischer Konzepte für energieeffiziente, intelligente LED-Straßenbeleuchtungssysteme“, Teilvorhaben „Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur Planung und Simulation und zur Überwachung und Steuerung von LED-Beleuchtungssystemen“ als ZIM-Kooperationsprojekt durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi gefördert.

verteilung und der Erkennbarkeiten beträgt 30,00 m zum Beginn des Bewertungsfeldes bei einer Beobachterhöhe $h_B = 0,75$ m. Die Neigung des Beobachtungswinkels entspricht somit dem in den Simulationen verwendeten. Die drei Lichtpunktabstände sind nach Tabelle 6.1 gewählt und in Abbildung 6.2 anhand der roten Felder hervorgehoben.

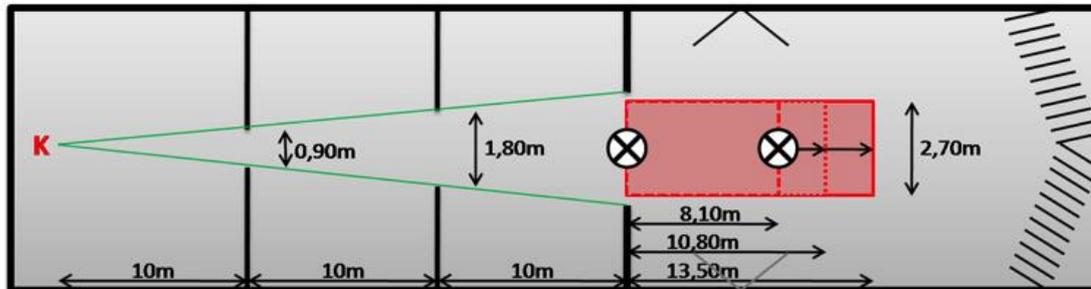


Abbildung 6.2: Aufsicht Versuchsaufbau. Rot: Messfeld und Beobachter. Weiß: Lichtpunkte [FRAUENHOFER 2015, S. 29].

Abbildung 6.2 zeigt die Lichtfallen, die zur Vermeidung von Streulicht in 10 m-Abständen zwischen Beobachterstandort und Messfeld platziert sind. Weitere Lichtfallen sind seitlich zum Messfeld positioniert. Am Ende der Laborfläche minimieren zwei unter Winkel arrangierte Vorhangs-Raster potentiell Streulicht. Sowohl der schwarze Spannstoff der Lichtfallen als auch der schwarze Anstrich der Wände wurden anhand entnommener Proben mit einer Ulbrichtschen Kugel des Typs RT 500 der Firma LMT Messgeräte GmbH gegen ein Keramik-Arbeitsreflexionsnormal gemäß DIN 5036-Teil 3 auf ihren Reflexionsgrad hin gemessen. Die bestimmten Reflexionsgrade variieren zwischen 3,5 % und 4,5 %. Der gesamte Aufbau wurde sowohl in der Simulation als auch in Vorversuchen¹⁸ auf den Einfluss von Streulicht hin untersucht. Der Einfluss des Streulichtes im Bereich des Messfeldes beläuft sich auf unter 1,5 %. Eine Übersicht gibt Tabelle A.32 des Anhangs.

Für eine exakte Bestimmung der $U_o(L)$ - und VL -optimierten LVK wurde der im Versuchsaufbau als Fahrbanddeckschicht verwendete Laborteppich hinsichtlich seiner Reflexionseigenschaften umfassend für die Beobachtungswinkel 1° und 3° mit jeweils zwei Proben gemessen¹⁹. Die Messwerte werden anhand ihrer r -Tabellen und Deckschichtenkennwerte nach Tabelle A.33 bis Tabelle A.38 des Anhangs der Optimierung zugrunde gelegt. Die Kämmrichtung des Teppichs entsprechend Abbildung 6.3 wird dabei berücksichtigt.

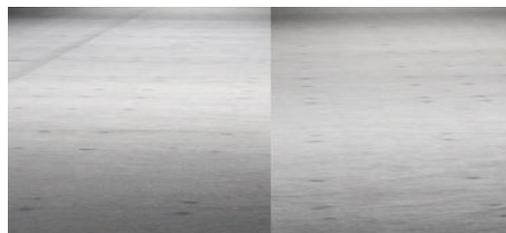


Abbildung 6.3: Einfluss der Kämmrichtung des Laborteppichs aus Beobachterrichtung und entgegengesetzt. Fotos gleicher Kameraeinstellung aus entgegengesetzter Blickrichtung.

¹⁸ Die Vorbereitungen und Durchführungen der Labormessungen erfolgten hauptsächlich innerhalb der Abschlussarbeiten von [SCHEIBLER 2013; JOCKISCH 2013; FRAUENHOFER 2015].

¹⁹ Die Messungen wurden durch das Wahrnehmungslabor/Lichttechnik des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der Technischen Universität Dresden durchgeführt.

6.2 DURCHFÜHRUNG

Abbildung 6.4 gibt einen schematischen Überblick zu den einzelnen Schritten des Versuchs. Der rechte Arm der Durchführung entspricht dem in Kapitel 4 beschriebenen Vorgehen in den Simulationen. Der linke Arm des Ablaufes wird folgend näher erläutert.

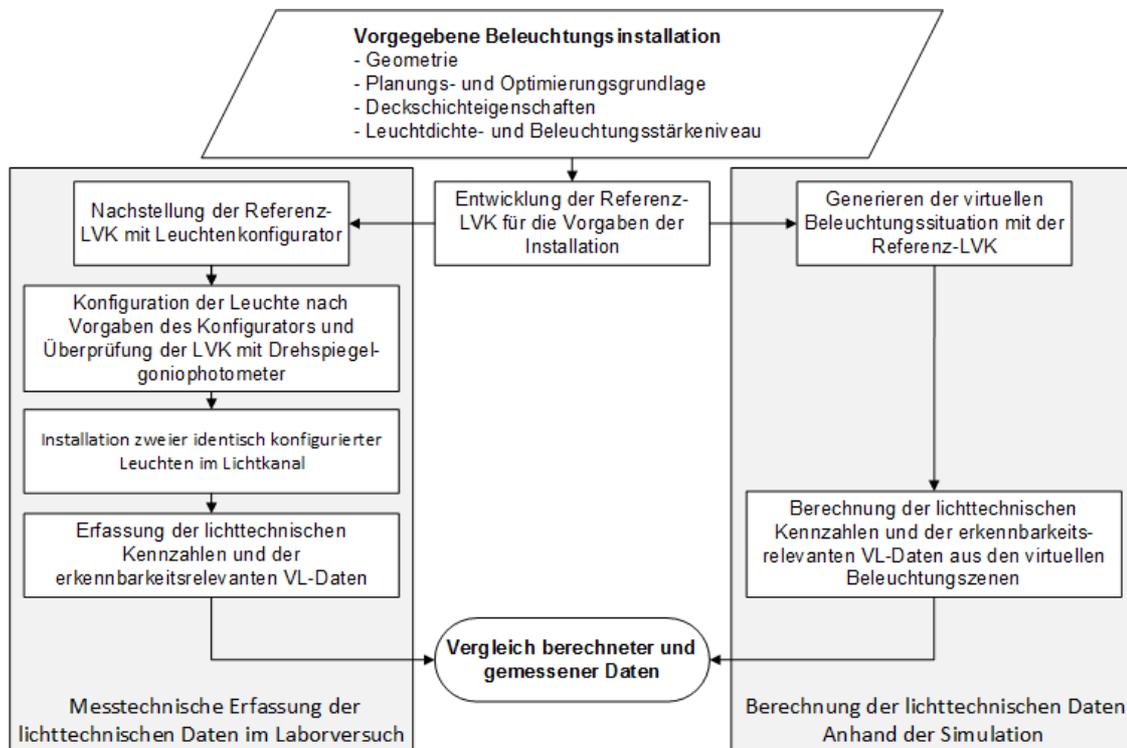


Abbildung 6.4: Ablaufdiagramm zum Vergleich der Simulationen mit realen Messungen.

Die Messung der LVK der Leuchte mit den jeweiligen nachgestellten RLVK erfolgt in C-Halbebenen nach DIN EN 13032-1 [DIN 2004; DIN 2007C] mittels eines Drehspiegel-Goniophotometers der Firma LMT entsprechend den Normen DIN 5032 [DIN 1999A; DIN 1992; DIN 1999B] sowie DIN EN 13032 [DIN 2005; DIN 2004; DIN 2007C; DIN 2006]. Der Lichtstrom wurde durch Integration der Lichtstärkeverteilung von C-Ebenen ermittelt. Die gemessenen LVK wurden in der Arbeit von SCHEIBLER [2013, S. 24] nach BERGEN [2012] auf ihre Übereinstimmung mit den entsprechenden simulierten Referenz-LVK hin verglichen, um auszuschließen, dass fehlerbehaftete LVK für die Laborversuche herangezogen werden. Da der gesamte Dynamikumumfang der verwendeten adaptiven LED-Leuchten zur Formung der verschiedenen LVK benötigt wird, wurden für jede Beleuchtungssituation Korrekturfaktoren KF zur Normierung auf das angestrebte Beleuchtungsniveau bestimmt [FRAUENHOFER 2015, S. 42 ff.]. Dies ist zulässig, da außer dem Lichtstrom der Leuchte keinerlei andere Parameter des Laborsetups geändert werden. Da die Simulationen auf eine mittlere Leuchtdichte von $\bar{L} = 0,75 \text{ cd/m}^2$ und vergleichbare $\bar{E}_{hor} = 10 \text{ lx}$ bezogen wurden (vgl. Kapitel 3.2), wurden die \bar{L} und \bar{E}_{hor} der Messungen entsprechend normiert.

Die Erfassung der Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteverteilungen sowie deren Kennzahlen erfolgte, entsprechend dem Vorgehen aus den Abschnitten 2.2.1 bis 2.2.3, unter den getroffenen Festlegungen aus Unterkapitel 3.2. Abbildung 6.5 beschreibt die Verteilung der herangezogenen Messpunkte für die drei untersuchten Lichtpunktstände. Aufgrund der fehlenden Einstell-

möglichkeiten der Leuchten quer zur Fahrbahn und der daraus resultierenden niedrigen Quergleichmäßigkeiten, wurden die innerhalb des Gesamtmessfeldes ermittelten Verteilungen von Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte nur vergleichend herangezogen und fließen daher nicht in die Bewertung mit ein. Die eigentliche Auswertung erfolgte anhand der Messwerte eines Streifens in der Mitte des Messfeldes, dessen Querabweichungen der Leuchtdichte und horizontalen Beleuchtungsstärke nicht größer als 5 % des jeweiligen Wertes auf der Mittellinie waren. In diesem Bereich von 60 cm Breite mittig des Hauptmessfeldes (Abbildung 6.5, dunkelrotes Feld) wurden 5, quer zur Fahrbahn gleichabständig angeordnete Messpunkte, je Messentfernung betrachtet. Die Messpunktauflösung betrug 15 cm. Längs der Fahrbahn betrug die gleichabständige Auflösung 10 Messpunkte je Messfeldlänge. Erster und letzter Messpunkt wiesen longitudinal jeweils einen halben Messpunkt Abstand zum Rand des Messfeldes auf. Für die zum Vergleich herangezogene Gesamtbreite des Messfeldes betrug die Messauflösung quer zur Fahrbahn 11 Messpunkte mit einem Abstand von 30 cm entsprechend Abbildung 6.5.

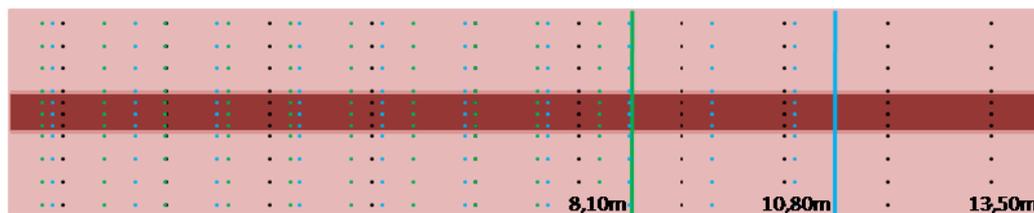


Abbildung 6.5: Messfeld (hellrot) mit zentralem Ausschnitt (dunkelrot) bei Lichtpunktabständen von 8,10 m (grün), 10,80 m (blau) und 13,50 m (schwarz) mit entsprechenden Messpunkten [FRAUENHOFER 2015, S. 34].

Entsprechend Abschnitt 2.2.4.11 erfolgte die Bestimmung der VL angelehnt an das Vorgehen im Rahmen des ANSI IESNA RP-8-00 [IESNA 2005] und unter Berücksichtigung der Festlegungen aus Unterkapitel 3.2. Beobachtungsgrundlage für die Leuchtdichteauswertungen und die VL_i -Bestimmungen war die kritischere stationäre Beobachtung. Bedingt durch die Eigenschaften des Laborsetups mussten jedoch Modifikationen im Vorgehen vorgenommen werden. Bei der Bestimmung der Erkennbarkeiten war das Sehobjekt aufgrund der beschränkten Messstrecke und dem flachen Beobachtungswinkel nicht mehr vollständig von einer kontinuierlichen Umfeldleuchtdichte, wie sie in einer periodischen Leuchteninstallation gegeben wäre, umschlossen. Abbildung 6.6 zeigt eine Beispielsituation mit einem Sehobjekt auf der letzten Messposition im Bewertungsfeld.

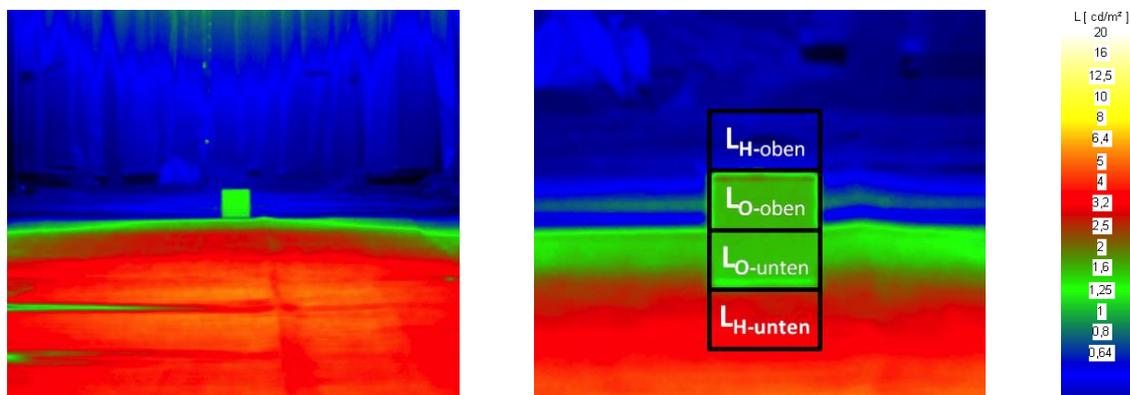


Abbildung 6.6: Begrenzung der Ausleuchtung hinter dem Messfeld. Links: Gesamtsituation. Rechts: Ausschnitt, Leuchtdichte-Bereiche zur direkten Objektcontrast-Bestimmung.

Der in den Simulationen herangezogene Bereich $L_{H\text{-oben}}$ aus Abbildung 6.6 konnte also nicht für die VL -Auswertung der Laborinstallationen verwendet werden, da sonst eine in der Realität nicht vorhandene Situation bewertet werden würde. In diesem Fall wurde aufgrund der hohen Gesamtgleichmäßigkeit der Leuchtdichte im Bewertungsfeld ausschließlich die untere Schobjektkante mit den Leuchtdichtebereichen $L_{O\text{-unten}}$ und $L_{H\text{-unten}}$ herangezogen.

6.3 RESULTIERENDE LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKÖRPER

Abbildung 6.7 gibt eine Übersicht über die für die Beleuchtungssituationen nach Tabelle 6.1 berechneten LVK für den Laborversuch. Die einzelnen Schritte der Nachstellungen dieser können den Abbildungen A.6 bis A.9 des Anhangs entnommen werden. Wie bereits bei den LVK-Visualisierungen des Kapitels 5 zeigt auch hier der blaue Volumenschnitt die C0-C180-Ebene der LVK, der rote Schnitt die C90-C270-Ebene. Die Hilfslinien des C-Ebenen-Koordinatensystems sind in 30° -Schritten unterteilt. Die Darstellung der LVK ist, der Übersichtlichkeit halber, zueinander rein qualitativ dargestellt und nicht auf gleiche Skalierung normiert. Der ausführliche Vergleich von berechneten Referenz-LVK mit den realisierten Leuchten-LVK findet sich in der Diplomarbeit von SCHEIBLER [2013].

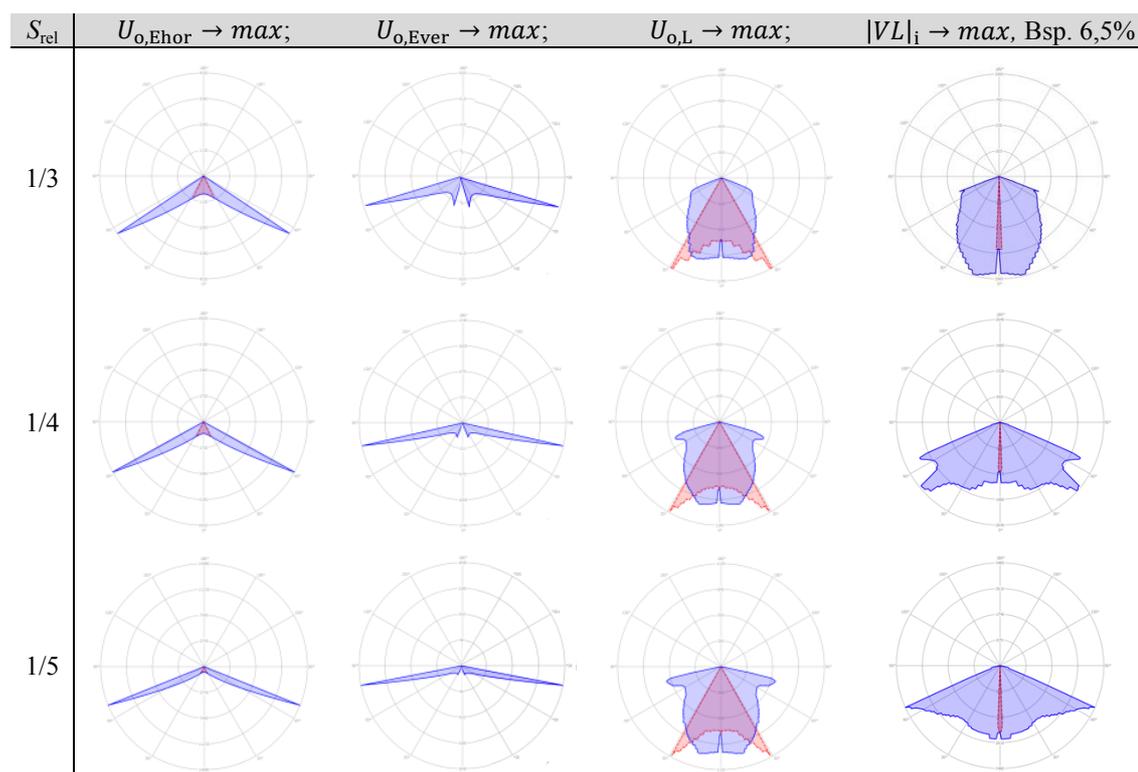


Abbildung 6.7: Optimierungziel und Referenz-LVK(RLVK) der ausgewählten Beleuchtungssituationen, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30° -Schritten, relative Darstellung.

6.4 ERZIELTE LEUCHTDICHTE-, BELEUCHTUNGSSTÄRKE- UND VL-VERTEILUNGEN

6.4.1 GLEICHMÄßIGKEITSORIENTIERTE OPTIMIERUNGEN

Die Längs- und Gesamtgleichmäßigkeiten der horizontalen und vertikalen Beleuchtungsstärken sind von den Beleuchtungsniveaus \bar{E}_{hor} , \bar{E}_{ver} und \bar{L} und somit auch von KF unabhängig. Sie wurden daher ohne eine Anpassung des Niveaus ermittelt. Die Tabellen 6.2 bis 6.4 geben eine Übersicht der erzielten Gleichmäßigkeiten bei reduzierter Messfeldbreite. Die Werte, deren Bewertungsmethode ihrem eigenen Optimierungsziel entspricht, sind grün unterlegt. Die zugehörigen Szenen sind in Abbildung 6.8 aus der Beobachterperspektive und in Abbildung 6.9 aus der Vogelperspektive als Leuchtdichtebilder dargestellt. Den in Abbildung 6.8 sichtbaren Einfluss der begrenzten Größe des Versuchsaufbaus diskutiert Kapitel 7.3. Die den Tabellen 6.2 bis 6.4 zugrunde liegenden Messwerte enthält Teil A.4 des Anhangs.

Tabelle 6.2: Übersicht der mit der adaptiven LED-Leuchte erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der Messung der horizontalen Beleuchtungsstärke für das Labor-Setup der Validierung.

E_{hor} -basierte Gleichmäßigkeiten für:	$W_{L, \text{red}}$	$S_{\text{rel}} = 1/3$		$S_{\text{rel}} = 1/4$		$S_{\text{rel}} = 1/5$	
		$U_{o, \text{Ehor}}$	$U_{l, \text{Ehor}}$	$U_{o, \text{Ehor}}$	$U_{l, \text{Ehor}}$	$U_{o, \text{Ehor}}$	$U_{l, \text{Ehor}}$
$U_o(E_{\text{hor}})_{\text{opt}}$	0,5 m	0,82	0,67	0,88	0,80	0,92	0,72
	0,6 m	0,76		0,73		0,84	
$U_o(E_{\text{ver}})_{\text{opt}}$	0,5 m	0,80	0,54	0,77	0,40	0,44	0,14
	0,6 m	0,79		0,78		0,41	
$U_o(L)_{\text{opt}}$	0,5 m	0,36	0,15	0,27	0,07	0,40	0,13
	0,6 m	0,36		0,27		0,39	

Tabelle 6.3: Übersicht der mit der adaptiven LED-Leuchte erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der Messung der vertikalen Beleuchtungsstärke für das Labor-Setup der Validierung.

E_{ver} -basierte Gleichmäßigkeiten für:	$W_{L, \text{red}}$	$S_{\text{rel}} = 1/3$		$S_{\text{rel}} = 1/4$		$S_{\text{rel}} = 1/5$	
		$U_{o, \text{Ehor}}$	$U_{l, \text{Ehor}}$	$U_{o, \text{Ehor}}$	$U_{l, \text{Ehor}}$	$U_{o, \text{Ehor}}$	$U_{l, \text{Ehor}}$
$U_o(E_{\text{hor}})_{\text{opt}}$	0,5 m	0,18	0,08	0,150	0,04	0,21	0,08
	0,6 m	0,19		0,16		0,22	
$U_o(E_{\text{ver}})_{\text{opt}}$	0,5 m	0,86	0,78	0,89	0,73	0,76	0,58
	0,6 m	0,77		0,84		0,77	
$U_o(L)_{\text{opt}}$	0,5 m	0,39	0,12	0,44	0,11	0,4	0,13
	0,6 m	0,41		0,42		0,39	

Tabelle 6.4: Übersicht der mit der adaptiven LED-Leuchte erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der Messung der Leuchtdichte für das Labor-Setup der Validierung.

L -basierte Gleichmäßigkeiten für:	$W_{L, \text{red}}$	$S_{\text{rel}} = 1/3$		$S_{\text{rel}} = 1/4$		$S_{\text{rel}} = 1/5$	
		$U_{o, \text{Ehor}}$	$U_{l, \text{Ehor}}$	$U_{o, \text{Ehor}}$	$U_{l, \text{Ehor}}$	$U_{o, \text{Ehor}}$	$U_{l, \text{Ehor}}$
$U_o(E_{\text{hor}})_{\text{opt}}$	0,5 m	0,56	0,35	0,32	0,12	0,37	0,17
	0,6 m	0,53		0,30		0,36	
$U_o(E_{\text{ver}})_{\text{opt}}$	0,5 m	0,42	0,28	0,37	0,23	0,67	0,46
	0,6 m	0,42		0,4		0,67	
$U_o(L)_{\text{opt}}$	0,5 m	0,79	0,66	0,72	0,56	0,78	0,61
	0,6 m	0,74		0,74		0,78	

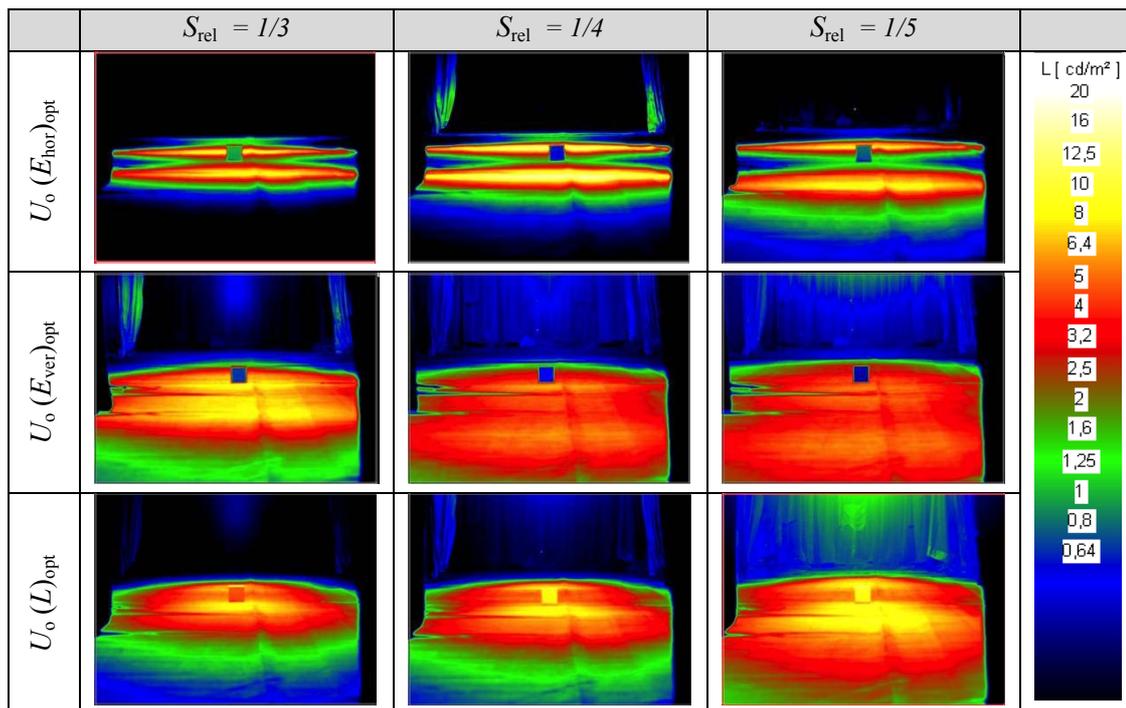


Abbildung 6.8: Leuchtdichtebilder U_o -orientierte Optimierungen, Variation des Lichtpunktabstands.

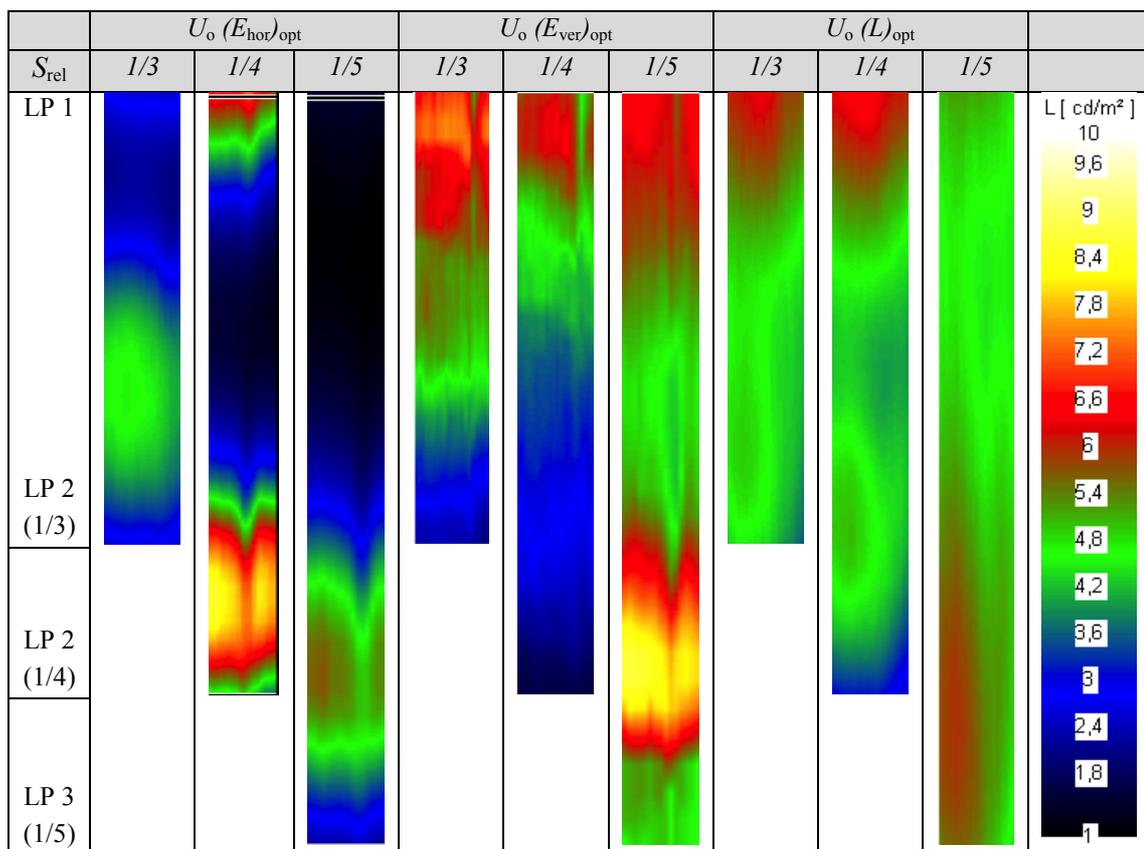


Abbildung 6.9: Vogelperspektive der Leuchtdichtebilder der U_o -orientierten Optimierungen, innere 50 % des Messfeldes quer zur Fahrbahn.

Das Optimierungsziel homogene Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke erzielt Gesamtgleichmäßigkeiten $> 0,82$ bei $W_{L,red} = 0,5$ m. Bei der vertikalen Beleuchtungsstärke sind deren Gleichmäßigkeiten $> 0,76$ und bei der Optimierung auf eine uniforme Fahrbahnleuchtdichte werden Gesamtgleichmäßigkeiten $> 0,72$ erreicht. Dies zeigt die Anpassungsfähigkeit der Optimierungsmethoden selbst an anspruchsvolle Beleuchtungssituationen, welche nicht auf Standardeigenschaften der Fahrbanndeckschicht (anhand von Standard- r -Tabellen) basieren. Der in Kapitel 5.2 dargestellte Effekt, dass die jeweilige Optimierung hinsichtlich ihrer zugrunde liegenden lichttechnischen Bewertungskennzahl die besten Ergebnisse erzielt, wurde unter den laborversuchsspezifischen Einschränkungen bestätigt.

6.4.2 ERKENNBARKEITSORIENTIERTE OPTIMIERUNG

Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus den Simulationen, nach denen sich die Güte VL -optimierter LVK nicht allein durch die Gleichmäßigkeit beschreiben lässt. Die Tabellen 6.5 bis 6.7 zeigen, dass die meisten VL -Optimierungen zwar $U_o > 0,4$ erzielen, der Unterschied zur Charakteristik der $U_o(L)$ -Optimierung in den Abbildungen 6.7 und 6.9 jedoch deutlich erkennbar ist: Die Lichtverteilungen zeigen die Charakteristik einer bestimmten Ungleichmäßigkeit. Abbildung 6.11 zeigt die Leuchtdichteverteilungen im Messfeld zusätzlich aus der Aufsicht.

Tabelle 6.5: Übersicht der erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der horizontalen Beleuchtungsstärke

E_{hor} -basierte Gleichmäßigkeiten für:	$W_{L, red}$	$S_{rel} = 1/3$		$S_{rel} = 1/4$		$S_{rel} = 1/5$	
		$U_{o, Ehor}$	$U_{l, Ehor}$	$U_{o, Ehor}$	$U_{l, Ehor}$	$U_{o, Ehor}$	$U_{l, Ehor}$
$U_o (VL_6)_{opt}$	0,5 m	0,40	0,14	0,15	0,06	0,36	0,09
	0,6 m	0,39		0,14		0,37	
$U_o (VL_{20})_{opt}$	0,5 m	0,52	0,07	0,75	0,14	0,74	0,52
	0,6 m	0,51		0,71		0,75	
$U_o (VL_{40})_{opt}$	0,5 m	0,42	0,13	0,59	01,0	-	-
	0,6 m	0,42		0,59		-	
	0,6 m	0,63		0,87		-	

Tabelle 6.6: Übersicht der erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der vertikalen Beleuchtungsstärke.

E_{ver} -basierte Gleichmäßigkeiten für:	$W_{L, red}$	$S_{rel} = 1/3$		$S_{rel} = 1/4$		$S_{rel} = 1/5$	
		$U_{o, Ehor}$	$U_{l, Ehor}$	$U_{o, Ehor}$	$U_{l, Ehor}$	$U_{o, Ehor}$	$U_{l, Ehor}$
$U_o (VL_6)_{opt}$	0,5 m	0,42	0,18	0,54	0,30	0,13	0,06
	0,6 m	0,42		0,53		0,13	
$U_o (VL_{20})_{opt}$	0,5 m	0,30	0,15	0,32	0,25	0,14	0,10
	0,6 m	0,30		0,32		0,14	
$U_o (VL_{40})_{opt}$	0,5 m	0,63	0,29	0,86	0,36	-	-

Tabelle 6.7: Übersicht der erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der Leuchtdichte.

L -basierte Gleichmäßigkeiten für:	$W_{L, red}$	$S_{rel} = 1/3$		$S_{rel} = 1/4$		$S_{rel} = 1/5$	
		$U_{o, Ehor}$	$U_{l, Ehor}$	$U_{o, Ehor}$	$U_{l, Ehor}$	$U_{o, Ehor}$	$U_{l, Ehor}$
$U_o (VL_6)_{opt}$	0,5 m	0,68	0,48	0,54	0,35	0,49	0,27
	0,6 m	0,62		0,52		0,49	
$U_o (VL_{20})_{opt}$	0,5 m	0,45	0,55	0,55	0,30	0,42	0,21
	0,6 m	0,45		0,54		0,41	
$U_o (VL_{40})_{opt}$	0,5 m	0,61	0,39	0,29	0,18	-	-
	0,6 m	0,48		0,29		-	

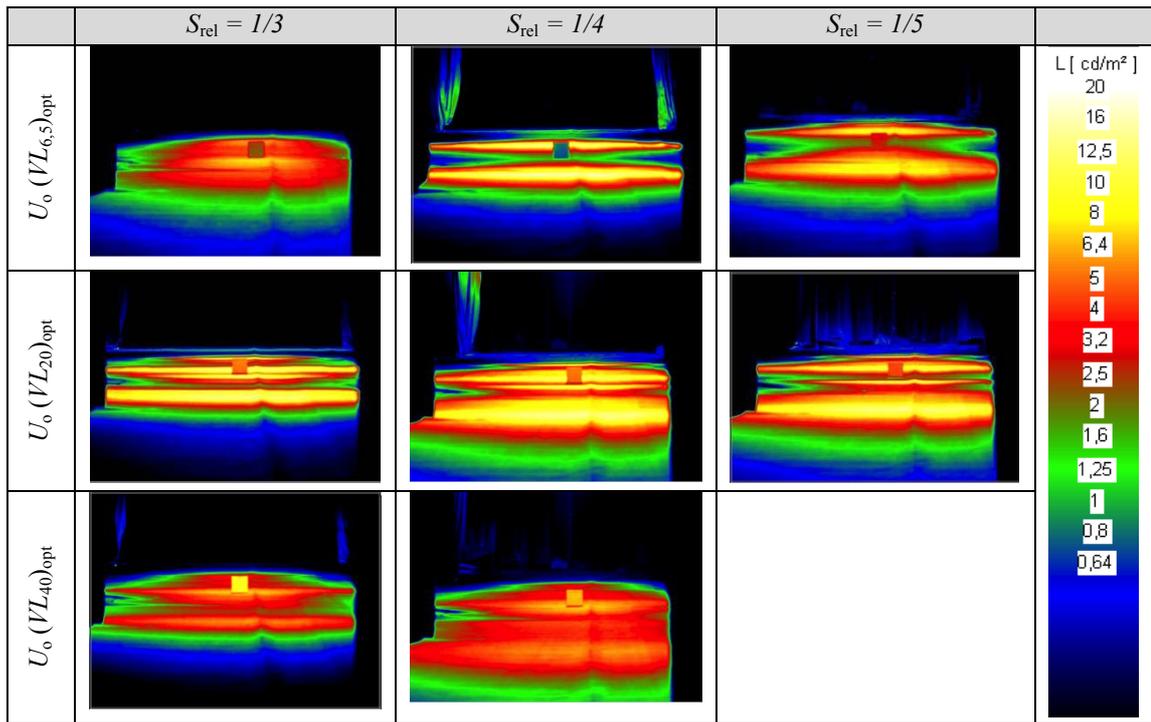


Abbildung 6.10: Leuchtdichtebilder VL-orientierte Optimierungen, Variation des Lichtpunktabstandes.

Die LVK der VL-Optimierung auf das 40 % Sehobjekt konnte mit den verwendeten LED-Leuchten nicht nachgestellt werden, da die zur Verfügung stehenden Lichtstärken unter flachen Ausstrahlwinkeln nicht ausreichen.

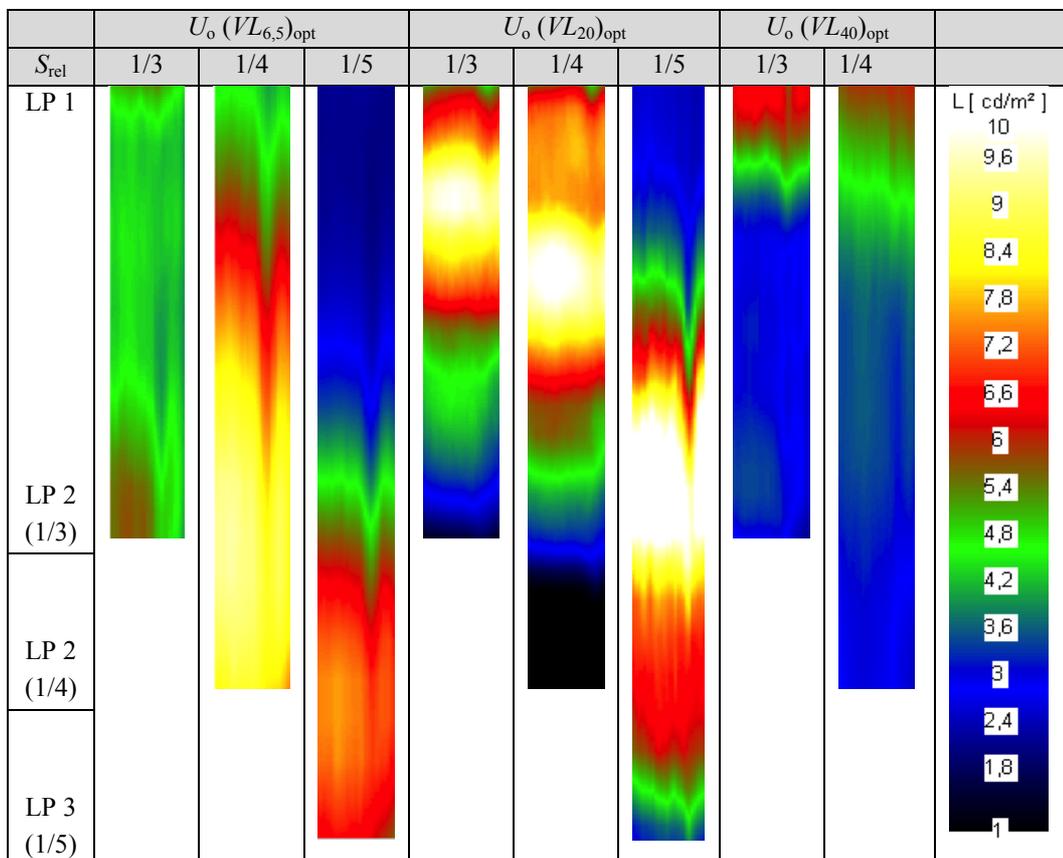


Abbildung 6.11: L-Verteilung der VL-Optimierungen, mittlere 50 % des Messfeldes, Vogelperspektive.

6.5 VERGLEICH DER SIMULATIONEN UND LABORMESSUNGEN

Die den Labor-Beleuchtungsszenen zugrunde liegenden LVK entsprechen nicht denen aus Kapitel 5, sondern den LVK nach Abbildung A.5 bis Abbildung A.8 des Anhangs, welche speziell für die Eigenheiten der Beleuchtungsinstallationen des Laborversuchs (z. B. Laborteppich als Fahrbahndeckschicht) berechnet wurden. Es ist daher zu differenzieren, ob Ergebnisse aus den allgemeinen Simulationen nach Kapitel 5 oder versuchsaufbauspezifische Simulationen betrachtet werden.

Die in den Simulationen berechneten $U_{o,E_{hor}}$ können mit den im Laborversuch unter Abweichung einzelner Werte bei Ausreißern von maximal 20 % bis 35 % unterhalb der simulierten E_{hor} -Verteilung nachgestellt werden. Die Gesamtgleichmäßigkeiten der Leuchtdichteoptimierung gleichen den Simulierten mit Abweichungen $< 10\%$. In beiden Fällen sind die realisierten Werte niedriger als die durch die Simulation angestrebten. Dies zeigt, dass selbst mit den für den Versuch zur Verfügung stehenden technischen Mitteln Lichtverteilungen realisiert werden können, die sehr nahe an die Vorgaben aus den Simulationen sind. Mit hochwertigeren Optiken und höheren Lichtströmen der einzelnen LED Module ließen sich die Abweichungen weiter verringern. Dies ist nicht lediglich ein Hinweis auf eine eventuelle praktische Anwendbarkeit der LVK-Optimierung, sondern bereits in diesem Stadium auch eine Bestätigung der Realisierbarkeit örtlich adaptiver Beleuchtungsanlagen mit installations-spezifisch optimierten LVK.

Für die VL -Optimierung wird die Gleichmäßigkeit nicht als Qualitätskriterium herangezogen, da ΔU keine Aussage über die Qualität der Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung gibt. Hierfür werden die erzielten Erkennbarkeiten selbst verglichen. Abbildung 6.12 sowie die Tabellen A.43 und A.44 des Anhangs beinhalten die Gegenüberstellungen der VL -Verläufe aus Simulation und Messung der 6 untersuchten Beleuchtungssituationen bei je 3 unterschiedlichen Mastabständen.

Die Abbildungen A.6 bis A.8 des Anhangs geben die Abweichung der zusammenfassenden Qualitätskennzahlen. Bei allen drei Mastabständen liegen die VL_i -Abweichungen für die $U_o(E_{ver})$ - und $U_o(L)$ -Optimierung in Bereichen $\Delta VL_i < 5$. Einzelne Werte $\Delta VL_i > 5$ können je nach Situation jedoch vorkommen. Bei der $U_o(E_{hor})$ -Optimierung liegen die Abweichungen mit wenigen Ausreißern im Bereich $\Delta VL_i < 10$. Anders verhält sich dies bei den VL_i -Optimierungen. Hier kommt es je nach Beleuchtungssituation zu guten Übereinstimmungen $\Delta VL_i < 4$ oder stark unterschiedlichen $\Delta VL_i > 10$. Dies lässt sich durch die eingeschränkten Anpassungsmöglichkeiten der verwendeten LED-Leuchten erklären. Kombinationen der zur Verfügung stehenden Optiken führen zu Abweichungen nach Abbildung 6.7 und den Übersichten A.6 bis A.9 des Anhangs gegenüber der RLVK. Im Vergleich zu den wahrnehmungsphysiologischen Anforderungen an das VL aus Abschnitt 2.2.5 können solche Abweichungen bereits über das Erkennen oder Nichterkennen eines Objektes entscheiden. Es bedarf somit weiterhin einer exakteren Nachstellung optimierter LVKs, wenn deren Optimierungsziel direkt das VL ist.

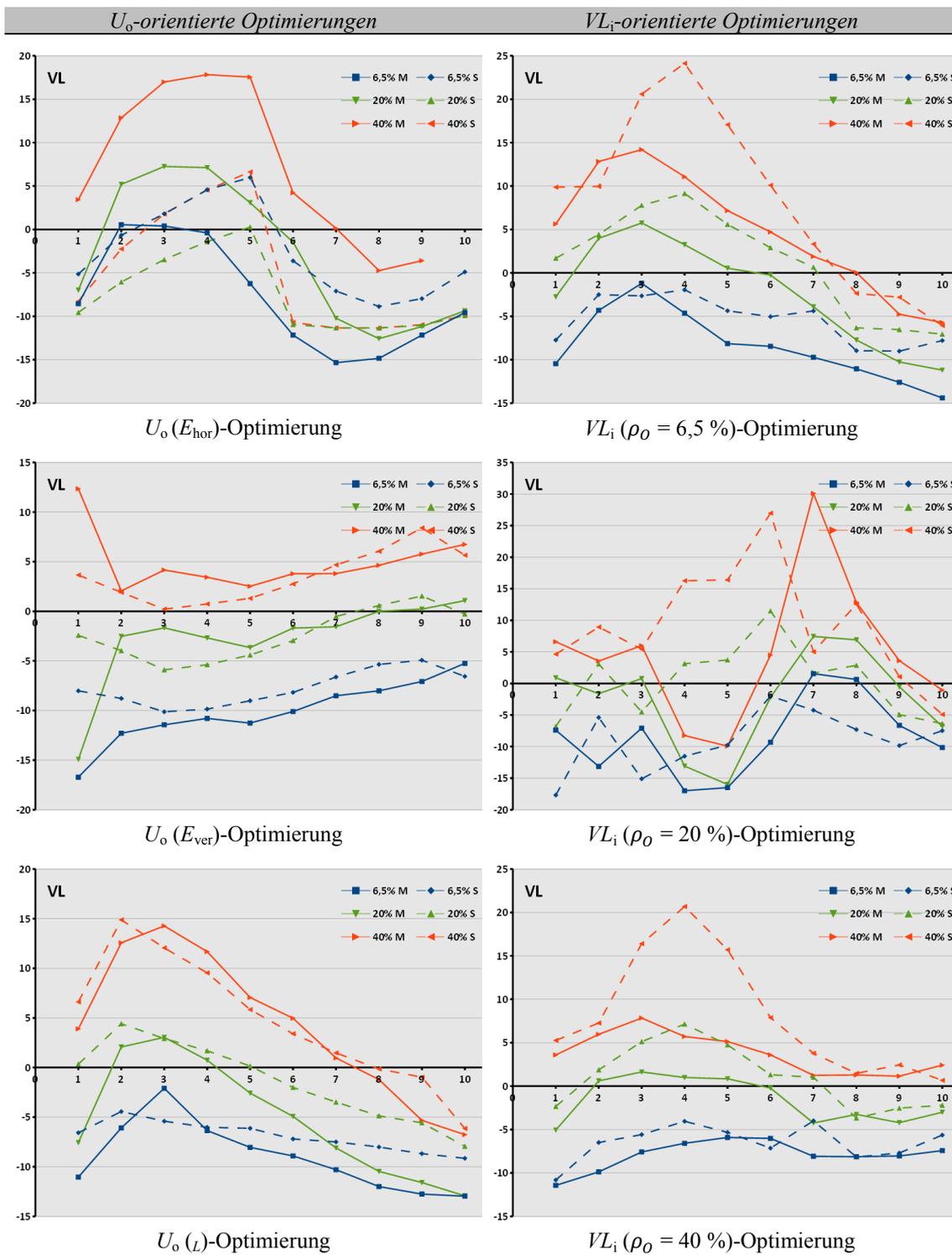


Abbildung 6.12: Vergleich von Mess- (M) und Simulationsergebnissen (S) für $S_{rel} = 1/3$ [FRAUENHOFER 2015, S. 63].

6.6 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des Laborversuches war die Prüfung der Umsetzbarkeit der nach den vier beschriebenen Optimierungszielen (vgl. Kapitel 3) generierten LVK in einer Realumgebung. Der Vergleich der resultierenden Beleuchtungssituationen mit den Simulationsergebnissen gibt Aufschluss über die einhergehenden lichttechnischen Herausforderungen. Die Ergebnisse des Versuches sind streng im Kontext mit den untersuchten Installationsgeometrien und den versuchsaufbaubedingten Einschränkungen zu sehen. So bestehen insbesondere durch die begrenzte lichttechnische Flexibilität der verwendeten LED-Leuchten Einschränkungen bei den Möglichkeiten der Umsetzung der berechneten LVK: Nicht alle Situationen konnten mit den vorhandenen adaptiven Leuchten bedient werden.

Für die Nachstellungen der gesamtgleichmäßigkeitsorientierten $U_o(E_{\text{hor}})$ -, $U_o(E_{\text{ver}})$ - und $U_o(L)$ -Optimierungen lassen sich bereits mit der hier zum Einsatz gekommenen Leuchte Lichtverteilungen mit den angestrebten hohen Gesamtgleichmäßigkeiten realisieren. Im Rahmen der beschriebenen Einschränkungen bestätigen die im Versuch gemessenen, sehr guten Gesamtgleichmäßigkeiten von $U_o(E_{\text{hor}}) > 0,82$ bei der $U_o(E_{\text{hor}})$ -Optimierung, $U_o(E_{\text{ver}}) > 0,76$ im Falle der $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung und $U_o(L) > 0,72$ für die Leuchtdichtoptimierung die praktische Anwendbarkeit der Optimierungen für die untersuchten Beleuchtungssituationen. Die vorgegebenen Gesamtgleichmäßigkeiten können mit entsprechenden Leuchtensystemen in der ortsfesten Straßenbeleuchtung also ebenso gut nachgestellt werden wie in der Simulationsumgebung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Lichtverteilungen der VL -Optimierung auch in den Labormessungen stets eine gewisse Ungleichmäßigkeit innerhalb der Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteverteilung aufweisen. Der Versuch unterstreicht die Simulationsergebnisse (vgl. Abschnitt 5.3.2), nach welchen die untersuchte VL -Optimierung nicht zwingend zu hohen Gesamtgleichmäßigkeiten $U_o(E_{\text{hor}})$ -, $U_o(E_{\text{ver}})$ - oder $U_o(L)$ führt.

Anhand des Vergleiches der jeweiligen VL_i -Verläufe aus Simulation und Messung wird offensichtlich, dass sich die Verlaufsgraphen qualitativ zwar – teils stark – ähneln, die Abweichungen einzelner VL_i oftmals jedoch größer als der eigentliche VL -Betrag des zugehörigen Messpunktes sein können. Hier besteht daher weiterhin der Bedarf präziserer und besser anpassbarer optische Systeme zur Realisierung der berechneten LVK zu entwickeln.

7

UNSICHERHEITSBETRACHTUNG

Grobe Fehler, durch eine der im Folgenden detailliert aufgeführten Ursachen, können durch die sachgerechte Verwendung hochwertiger Messgeräte, eine sorgfältige Planung und kritische Auswertung sowie präventive Maßnahmen weitgehend ausgeschlossen werden [vgl. GRÄNICHER 1996, S. 1 ff.; GESCHKE 2001]. Im Rahmen der getroffenen Einschränkungen werden daher in der kumulativen Gesamtunsicherheit am Ende dieses Kapitels keine groben Fehler berücksichtigt.

Systematische Messunsicherheiten, die bei der Wiederholung von Messungen und Teilversuchen immer in gleicher Weise auftreten, resultieren einerseits aus Genauigkeitsgrenzen von Messgeräten, Maßen und Messgegenständen. Andererseits kann die Unvollkommenheit der Art und Beeinflussungen des verwendeten Messverfahrens zu systematischen Unsicherheiten führen. Die Diskussion von Messabweichungen und Unsicherheiten dieses Kapitels bezieht sich im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich auf systematische Messunsicherheiten [vgl. SCHADE 2008, S. 72; GRÄNICHER 1996, S. 1 ff.]. Im Zusammenhang mit der VL-Messung und -Berechnung können sie nach Lewin in drei wesentliche Kategorien unterteilt werden [vgl. LEWIN 1993, S. 83]:

1. Berechnungsfehler (siehe Kapitel 7.1 und 7.2):
 - Fehler in den aktuellen Formeln
 - Fehler in der Interpretation der Vorgaben zum Vorgehen
 - Programmierungsfehler und -Unsicherheiten
2. Messgeräteunsicherheiten (siehe Kapitel 7.3):
 - Kalibrierungsunsicherheiten
 - Qualitätsprobleme bei den Messgeräten
3. Unsicherheiten durch Feldbedingungen (siehe Kapitel 7.3):
 - Fahrbahndeckschicht
 - Sehobjekteigenschaften
 - Beleuchtungsanlage
 - Leuchten- und Lichtquelleneigenschaften
 - Streulicht

7.1 VL-BESTIMMUNG

Sowohl Reliabilität und Validität der Erkennbarkeitsbestimmung durch den VL an sich als auch die Verwendung von Graukarten als Sehobjekte sind nicht unumstritten. Die Diskussion und Untersuchung der Methode als solche sind ebenso wenig Bestandteil dieser Arbeit wie die Bewertung der Grautafeln oder allgemein das Heranziehen kleiner einfacher Sehobjekte zur Bestimmung der Erkennbarkeit. Es sei an dieser Stelle daher ausdrücklich auf die Ergebnisse von VÖLKER [2006], LECOCQ [in GÜLER & ONAYGIL 2003; 1991; 1993; 1997], KECK & VICKSBURG [1993], KECK & STARK [1987] sowie GÜLER, ONAYGIL & SIMPSON [2003] verwiesen.

7.2 BERECHNUNG UND SIMULATION DER LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKÖRPER

Die in Kapitel 4 vorgestellte Optimierung von Lichtstärkeverteilungskörpern enthält Vereinfachungen, ohne welche eine effiziente Berechnung einer eindeutigen Lösung für optimierte LVK unter den in 3.2 definierten Vorgaben nicht möglich wäre. In diesem Unterkapitel werden mögliche Abweichungen und Unsicherheiten diskutiert. Diese liegen jedoch weit unter den nach JANOFF [1993] und GIBBONS [1997] beschriebenen Abweichungen älterer Simulationsprogramme.

7.2.1 ABWEICHUNGEN DURCH INTERPOLATION BEI TRANSFORMATION UND GLÄTTUNG

Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Lichtstärkeverteilungskörper werden mit einer Winkelauflösung von 1° für C-Ebenen- und γ -Winkel anhand räumlicher Kugelkoordinaten generiert. Die Auflösung der Messpunkte beträgt 10×20 Berechnungspunkte²⁰ je Messfeld in der horizontalen Ebene – entsprechend dem kartesischen Koordinatensystem –, um extrem hohe Rechenzeiten zu vermeiden. Trotz hoher Raster- und Winkel-Auflösung ist bei der Transformation der Daten eine Interpolation der Einzelwerte notwendig, um den Informationsverlust beim Wechsel zwischen den Koordinatensystemen gering zu halten.

Für die vorliegende Art der Transformation hat sich die IDW (inverse Distanzgewichtung) als zugleich einfache und zuverlässige Interpolation erwiesen. Sie ist in der digitalen Bildverarbeitung und -Analyse zur Abschätzung der räumlichen Abhängigkeit von Daten nach aktuellem Stand der Technik und der allgemeinen Arbeitspraxis anerkannt [vgl. STEBLAU 2013, S. 33]²¹.

Unter der in Abschnitt 3.2.2 getroffenen Einschränkung eines räumlich stetigen Verlaufs der Einzellichtstärken der LVK wird die interpolationsbedingte Unsicherheit bei der Transformation der Berechnungsdaten zwischen räumlich polarem und kartesischem Koordinatensystem im Rahmen der Arbeit als vernachlässigbar klein angenommen. Dies gilt ebenso für Interpolationen innerhalb perspektivischer Umrechnungen der projektiven Entzerrung im Falle der Leuchtdichteberechnung. Näheres hierzu findet sich in [STEBLAU 2013].

²⁰ Höhere Auflösungen führten für die direkten VL-Optimierungen bei den verwendeten Messrechnern am Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin zu einem Überlauf des Arbeitsspeichers.

²¹ Ausführliche Informationen zur IDW und deren Anwendung sind sekundär STEBLAU [2013, S. 33 f.] und dessen Primärgrundlage [JIANG & PETKOV 2009, S. 509 ff.] zu entnehmen.

Abbildung 7.1 zeigt, wie sich innerhalb der Simulation die Wahl der Anzahl der Stützstellen auf die Lichtverteilung auf der Fahrbahn auswirkt. Die zugrunde liegende LVK ist nicht geglättet, so dass sich ein schachbrettartiges Raster abzeichnet.

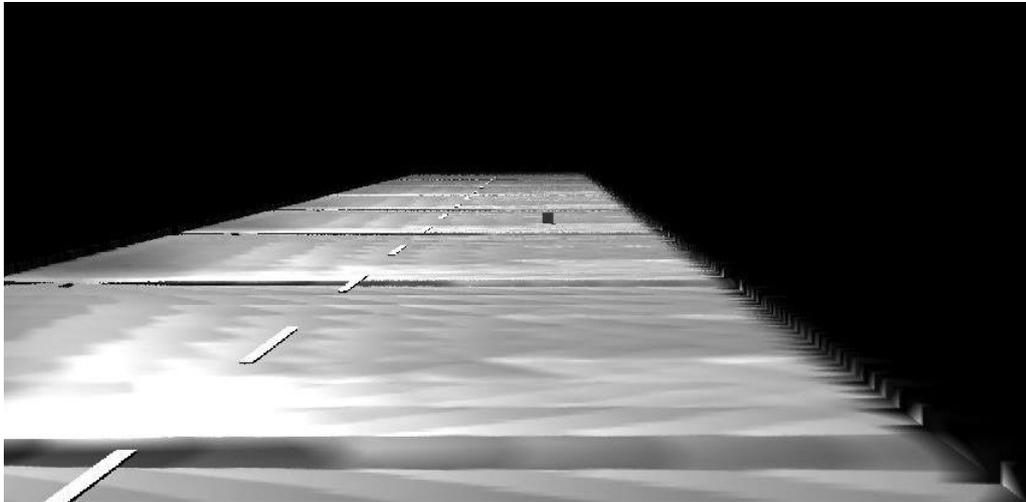


Abbildung 7.1: Visualisierung der Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahn aus Sicht des Beobachters bei Verwendung einer nicht geglätteten LVK.

Die Anwendung der Glättung nach Kapitel 3.2.2 reduziert die Sprünge in der LVK so weit, dass die Lichtverteilung auf der Fahrbahn zu stetigen Verläufen, wie in Abbildung 4.5 auf Seite 62 führt. Bei Vergleichsmessungen mit drei Strahlverfolgungssimulationsprogrammen konnten aufgrund der hohen Auflösungen der berechneten Lichtstrahlen der LVK nur vernachlässigbar kleine glättungsbedingte Abweichungen hinsichtlich der Verteilung von Leuchtdichte und horizontaler Beleuchtungsstärke auf der Fahrbahn festgestellt werden.

7.2.2 LINEARISIERUNG DER LEUCHTDICHTEUNTERSCHIEDSSCHWELLE

Abhängig von der gewählten Tangenten- bzw. Sekantenzahl besteht bei der in Kapitel 4.4.1 beschriebenen Linearisierung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle eine Approximationsabweichung. Abbildung 4.1 auf Seite 56 dieses Kapitels zeigt, wie sich die Approximationsabweichung der Sekantennäherung auf die Nachbildung der Kontrastschwelle auswirkt. So entstehen trotz der Minimierung des Offsets mittels linearer Regression, Abweichungen von der Ursprungskurve. Diese sind abhängig vom Abstand der beiden Berührungspunkte von Leuchtdichteunterschiedsschwelle und Regressionssekante. Da für jede berücksichtigte Unterschiedsschwelle (jedes in Frage kommende Adaptationsniveaus) diese Annäherung durchgeführt werden muss, hat deren Auflösung maßgeblichen Einfluss auf die Rechenzeit. Für das dieser Untersuchung zugrunde liegende $\alpha \approx 11'$ -Standardsehobjekt ergeben sich bei einer Regressionssekante vor allem bei sehr niedrigen Leuchtdichten Linearisierungsabweichung nach Tabelle 7.1 [vgl. STEBLAU 2013, S. 35 ff.]. Ebenda finden sich darüber hinaus ausführliche Analysen zu Validität und Reliabilität der Optimierungssoftware sowie deren mathematischer Ansätze [STEBLAU 2013]. Dies zeigt, dass die Anwendbarkeit der Optimierung nur für Lichtverteilungen mit mittlerer bis hoher Gleichmäßigkeit eine präzise Näherung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle garantiert.

Anhand der L_{\min} -zu- L_{\max} -Differenzen von Tabelle A.4 bis Tabelle A.7 wird deutlich, dass die meisten Beleuchtungsinstallationen Leuchtdichteniveaus im Bereich von 0,5 bis 2 cd m⁻² aufweisen und somit mit einer maximalen Linearisierungsabweichung von $< \pm 3 \%$ zu beziffern sind. In Einzelfällen können jedoch auch minimale Leuchtdichten von 0,3 cd m⁻² oder maximale Werte von 4,7 cd m⁻² auftreten. Diese sind dann gesondert zu betrachten und die Abweichungen individuell zu berechnen.

Tabelle 7.1: Maximaler Linearisierungsabweichung in Abhängigkeit des Leuchtdichteniveaus [Stebblau 2013, S. 38].

Leuchtdichteniveau	Maximale Linearisierungsabweichung
0,1 bis 3 cd m ⁻²	$\geq \pm 50 \%$
0,5 bis 1 cd m ⁻²	$< \pm 2 \%$
0,5 bis 2 cd m ⁻²	$< \pm 3 \%$
0,5 bis 3 cd m ⁻²	$< \pm 5 \%$
1,0 bis 2 cd m ⁻²	$< \pm 1 \%$
1,0 bis 3 cd m ⁻²	$< \pm 2 \%$
1,0 bis 6 cd m ⁻²	$< \pm 3 \%$

7.2.3 INDIREKTE BELEUCHTUNG UND SCHATTENBILDUNG DES SEHOBJEKTES

Wie bereits in Kapitel 2.2.4.3 beschrieben, wird das Sehobjekt in der realen Feldsituation nicht ausschließlich direkt beleuchtet, sondern erfährt auch indirekte Beleuchtungskomponenten, welche durch die Reflexion über die Fahrbahndeckschicht verursacht werden. Sie lassen sich nach Formel (2.33) auf Seite 20 addieren. Abbildung 2.8 auf Seite 20 veranschaulicht dies.

Aufgrund der Komplexität der Integration der indirekten Beleuchtung des Sehobjektes in die Optimierungs- und Auswertungssoftware wird keine Berechnung des Indirektanteils der Sehobjektbeleuchtung durchgeführt. So können Abweichungen zwischen simulierten und real zustande kommenden Ergebnissen entstehen. Bei niedrigen Reflexionsgraden der Fahrbahndeckschichten und unter flachen Beobachtungswinkeln, wie sie bei der Leuchtdichte- und VL-Bewertung und -Planung in der ortsfesten Straßenbeleuchtung herangezogen werden, sind diese Abweichungen nach LEWIN [1993, S. 84. ff.] sowie ADRIAN ET AL. [1993] zwar zu vernachlässigen; unter bestimmten größeren Beobachtungswinkeln kann jedoch in manchen Fällen ein substanzieller Einfluss reflektierten Lichts von der Fahrbahn auf das Objekt vorkommen [LEWIN 1993, S. 85]. Die daraus resultierenden Abweichungen hinsichtlich des VL sind sehr aufwendig zu ermitteln. Dies belegen bereits Untersuchungen von ADRIAN & GIBBONS [1993] sowie von ADRIAN ET AL. [1993] und ADRIAN [1995], welche ausschließlich für den Fahrbahndeckschichttypus R3 durchgeführt wurden und für diesen zeigen, dass „der von der Straße reflektierte Anteil [des auf das Sehobjekt reflektierten Lichts] sehr wesentlich sein kann“ ADRIAN [1995, S. 825]. Das in diesen Arbeiten vorgeschlagene Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Indirektanteils unterteilt die unmittelbar vor dem Sehobjekt liegende Straßenoberfläche in 10 x 10 cm große Quadrate nach Kapitel 2.2.4.3, welche als sekundäre Lichtquellen betrachtet werden. Die Untersuchungen zeigten, dass je nach Objektposition der Einfluss der indirekten Beleuchtung den VL bei niedrigen Werten, nahezu um den Faktor 2 verringern kann [vgl. ADRIAN 1995, S. 825]. Die Ergebnisse wurden jedoch als vorläufig deklariert [vgl. ADRIAN ET AL. 1993, S. 98] und zeigen Abweichungen zwischen den Darstellungen aus 1993 und 1995. Die Berücksichtigung der Anteile indirekter Beleuchtung an

der Objektleuchtdichte setzte sich bisher in der aktuellen Forschung zur Erkennbarkeit der Straßenbeleuchtung noch nicht durch [LEWIN 1993, S. 86], so dass diese vorläufigen Ergebnisse als ernstzunehmender Hinweis zu sehen sind.

In seiner Veröffentlichung zur Berechnung des *STVL* mithilfe der Software Radiance verweist Phillips auf unveröffentlichte Messungen von Keck. Ihnen zugrunde liegende Radiance-Berechnungen mit berücksichtigter Indirektreflexion der Fahrbahn führten dazu, dass im Vergleich zu konventionellen Simulationen ohne diese Berücksichtigung, welche meist das 40 % Sehobjekt für *STV*-Werte betrachten, das 20 % Sehobjekt die kritischsten Werte aufweist [vgl. PHILLIPS 1993, S. 32 f.].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden keine Untersuchungen zu Abweichungen, bedingt durch indirekte Beleuchtungsanteile auf dem Sehobjekt, durchgeführt. Quantitative Aussagen zu diesbezüglichen Auswirkungen sind daher aktuell nicht möglich. Neben der indirekten Beleuchtung des Sehobjektes kann die Berücksichtigung von Sehobjektschatten starken Einfluss auf die Erkennbarkeit anhand des *VL* haben. Zum Einfluss des Objektschattens auf den Visibility Level gibt es bisher kaum belastbare, ausführliche Untersuchungen [LEWIN 1993, S. 86 ff.]. Der Objektschatten wird weder auf Seite der LVK-Optimierung noch bei der Auswertung mittels Radiance berücksichtigt.

7.2.4 ANZAHL DER BERÜCKSICHTIGTEN LICHTPUNKTE

Bei der Berücksichtigung des weiteren periodischen Verlaufes der Lichtpunkte als wesentliche Voraussetzung der LVK-Optimierung wird oftmals kritisiert [ENZMANN 1977, S. 42], dass eine ausschließliche Betrachtung der unmittelbar an das Bewertungsfeld grenzenden Leuchten nicht ausreicht, um gültige LVK für gute Gleichmäßigkeiten und Erkennbarkeiten zu gewährleisten. Die in dieser Arbeit angewandte Optimierung berücksichtigt zugunsten der Effektivität bei der Anpassung der LVK zwar explizit 2 Lichtpunkte, einen zu Beginn des Bewertungsfeldes und einen an dessen Ende. Um jedoch rekursiv innerhalb der Optimierung zu prüfen, wie sich die LVK auf den gesamten periodischen Verlauf einer Beleuchtungsinstallation auswirkt, werden 2 weitere Lichtpunkte vor dem Bewertungsfeld und 4 weitere Lichtpunkte hinter dem Bewertungsfeld berücksichtigt. Eine Betrachtung weiterer Lichtpunkte führt lediglich zu vernachlässigbar kleinen Genauigkeitsgewinnen bei stark erhöhtem Rechenaufwand.

Ein Ergebnis ohne die Betrachtung des periodischen Verlaufes der Lichtpunkte zeigt die Verifikation mittels des Laborversuches, welcher mit 2 Leuchten durchgeführt wurde. Hier können keine Objektkontraste im herkömmlichen Sinne durch Mittelung des Kantenkontrastes von oberer und unterer Sehobjektkante vorgenommen werden, da der Untergrund des Objektes zu großen Teilen an vielen Messpunkten bereits in unbeleuchteten Bereichen liegt.

7.2.5 UNSICHERHEITEN BEI DER VL-BERECHNUNG

Zur Bestimmung der Unsicherheiten der *VL*-Berechnung mit dem am Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin von Winter und Franke [2012] entwickelten Matlab-Radiance-Framework, vergleicht Franke in seiner Arbeit zur Gütebewertung der Lichtsimulationen von Straßenbeleuchtungsszenen umfassend dokumentierte reale Messungen zweier Beleuchtungsanlagen mit in Radiance simulierten virtuellen Nachtstellungen der Beleuchtungsinstallationen (siehe dazu auch [PSYRIDIS 2010; KRENZ 2009; KRENZ 2010; SCHADE & VÖLKER 2011]). Seine

Betrachtungen umfassen sowohl die implementierten Auswertungsmethoden und Fahrbahn-deckschichten als auch Störquellen und ambiente Parameter unter dem Einfluss des Beobachterwinkels und der Berücksichtigung der Grenzen der Radiance-Simulation [FRANKE 2012]. Er gibt die maximale Abweichung zwischen Simulation und realer Messung für die beiden bewerteten Straßen bei der Bestimmung der Hintergrundleuchtdichte mit 12,9 % und 9,9 % an. Unter Berücksichtigung, der stark abstrahierten Umgebung der Beleuchtungssituation (siehe Abbildung 4.6 auf Seite 62), kann dies in Hinsicht auf eine Studie zur Genauigkeit von Lichtsimulationen [OCHOA ET AL. 2012], nach welchen in gängigen Systemen Abweichungen von 5 % bis 20 % zwischen Simulation und Messungen vorliegen, als große Abweichung angesehen werden. Die Abweichungen der Leuchtdichten des Sehobjektes liegen jedoch mit 24,7 % und 41 % wesentlich höher. Franke führt dies unter anderem auf die nicht vollkommen diffuse Reflexionscharakteristik der für die realen Messungen verwendeten Grautafel zurück [Franke 2012, S. 68]. Hinsichtlich der Simulationen wird die maximale Unsicherheit unter Vorbehalt mit 15 % angegeben, da die oben bezifferten 12,9 % aus einem Test Case stammen.

7.2.6 GESAMTUNSICHERHEIT DER SIMULATIONEN

Die maximale Gesamtunsicherheit der Simulationen für den in der Arbeit angestrebten Leuchtdichtebereich von 0,5 bis 2 cd/m² ergibt sich aus einer maximalen Linearisierungsabweichung von $< \pm 3 \%$ und einer mit Vorbehalt angenommenen maximalen Abweichung von 15 % seitens der *VL*-Auswertung in Summe zu 18 %. Die quadratische Summe der Abweichungen beläuft sich dementsprechend auf einen Gesamtunsicherheit von circa 15,3 %.

Diese Gesamtunsicherheit setzt eine sorgfältige Wahl der Stützstellen für die Linearisierung der Leuchtdichteunterschiedsschwelle voraus und schließt den Einfluss des Sehobjektschattens oder der indirekten Beleuchtung des Sehobjektes vollständig aus.

7.3 UNSICHERHEITEN MESSUNG

7.3.1 BESTIMMUNG DES LICHTSTÄRKEVERTEILUNGSKÖRPERS

Die Bestimmung des Lichtstärkeverteilungskörpers der für die Validierung verwendeten LED-Leuchte erfolgte mit einem Drehspiegelgoniophotometer GO-DS 2000 der Firma LMT. Das Photometer entspricht der Messgenauigkeitsklasse *L* nach DIN 5032 - Teil 7 [DIN 1985] einschließlich der Spiegeleigenschaften mit einer zulässigen Gesamtunsicherheit von 3 %.

Die Messungen sowie deren Auswertungen und Ergebnisverarbeitung wurden entsprechend den normativen Empfehlungen nach DIN 5032 – Teil 1, 2, 4 sowie DIN EN 13032 – Teil 1 und 2 durchgeführt [DIN 1999A; DIN 1992; DIN 1999B; DIN 2004; DIN 2006; DIN 2005; DIN 2007C]. Die Messungen erfolgten bei einer Messentfernung von $d_{\text{mess}} = 17,668 \text{ m}$ [ROCHOW 2009] und einer Lichtaustrittsfläche mit $2r < 1 \text{ m}$ der gemessenen Leuchte in Distanzen größer der photometrischen Grenzentfernung mit einer zulässigen Unsicherheit $< 0,1 \%$. So kann die vereinfachende Annahme der Lichtaustrittsfläche als Punktlichtquelle getroffen werden. Die zu erwartende relative Messunsicherheit für diffus strahlende Lichtquellen ergibt sich nach [HENTSCHEL 2002, S. 26 f.] mit

$$f = \frac{r_{\text{Leuchte}}^2}{r_{\text{Leuchte}}^2 + d_{\text{mess}}^2} \quad (7.1)$$

zu $f < 0,08 \%$. Gegenüber der zu erwartenden Gesamtunsicherheit der Spiegelgoniophotometers ist dies vernachlässigbar klein.

7.3.2 LEUCHTENMONTAGE UND -EINSTELLUNG

Sowohl bei der Bestimmung der LVK im Goniophotometer als auch bei den Messungen der Lichtverteilungen im Laborversuch hängen Reproduzierbarkeit und Richtigkeit maßgeblich von der Genauigkeit der Positionierung der Leuchte und den LED-Modulen in der Leuchte ab.

Für die Messungen der LVK im Drehspiegel-Goniophotometer wird die LED-Leuchte fest eingespannt und kann mittels Laser hinsichtlich Neigungs-, Verdrehwinkel und Position exakt ausgerichtet werden. Dies geschieht manuell mit größter Sorgfalt anhand entsprechender Markierungen an der Leuchte. Eine Unsicherheit lässt sich hierfür nicht angeben, ist jedoch als vernachlässigbar zu erwarten. Dies gilt ebenso für die Montage und Ausrichtung der Leuchten auf der optischen Bank, welche ebenso per Laser vorgenommen wurde.

Die Ausrichtung der Module in der Leuchte erfolgt ebenfalls visuell und erfordert hohe Konzentration und Sorgfalt, damit diese richtig ausgerichtet sind. Es hat sich herausgestellt, dass einige Optiken nicht exakt in den Modulen positioniert waren, so dass über mehrere Messungen hinweg immer wieder Anpassungen vorgenommen werden mussten, bis eine zufriedenstellende Konfiguration abgeschlossen war (siehe auch [SCHEIBLER 2013]).

Eine exakte Bezifferung möglicher Messabweichungen war im Rahmen der Messungen hier nur über die relative Abweichung der gemessenen Beleuchtungsstärken anhand einer Reihe von Vergleichsmessungen möglich. Die maximale relative Abweichung beträgt hier $< 27 \%$.

7.3.3 MESSUNG BELEUCHTUNGSSTÄRKE

Sämtliche Beleuchtungsstärkemessungen wurden mit dem Beleuchtungsstärkemessgerät „mobi Lux“ des Herstellers Czibula & Grundmann Engineering GbR durchgeführt. Es handelt sich um eine Kombination aus einem Beleuchtungsstärkemessgerät der Klasse B nach DIN 5032-7 [vgl. DIN 1985, S. 2] und EN 13032-1, Anhang B [DIN 2004] mit einer Gesamtmessunsicherheit $< 10 \%$ und einem Beleuchtungsstärkemesskopf der Klasse A entsprechend DIN 5032. Eine ausführliche Auflistung der Zusammensetzung der Gesamtunsicherheit ist in Tabelle A.40 des Anhangs angeführt.

7.3.4 BILDAUFGELÖSTE MESSUNG DER LEUCHTDICHTE

Die herstellerseitige Kalibrierung der verwendeten Leuchtdichtemesskamera LMK 98-4 Color erfolgt entsprechend der durch die DIN 5032 [DIN 1999A; DIN 1985] vorgegebenen Verfahren und Klassifizierung für herkömmliche Leuchtdichtemessgeräte, da es für Messgeräte ortsaufgelöster Leuchtdichtemesstechnik keine gesonderten normativen Anforderungen gibt. Gemessen an der kritischsten Einzelunsicherheit wird die LMK 98-4 Color mit einem konventionellen Leuchtdichtemessgerät der Klasse B verglichen, was zu einer zulässigen Gesamtmessunsicherheit von 10 % für konventionelle Leuchtdichtemessgeräte führt.

Zur Prüfung der Genauigkeit der Messung niedriger Leuchtdichten wurde die Kamera mit einem kalibrierten Leuchtdichtemessgerät der Klasse A der Firma LMT und einem kalibrierten Spektroradiometer CS 2000 der Firma Konika Minolta, welches für extrem niedrige Leuchtdichten bis 0.003 cd/m^2 die Spezifikation der Messklasse A erfüllt, verglichen. Eine Übersicht der relevanten Messgeräteklassen nach DIN 5032 und der herangezogenen Messgeräte sind Tabelle 7.3 zu entnehmen. Die Messergebnisse des Vergleichs zeigen Abbildungen 7.2 und 7.3.

Für diesen Vergleich wurde ein $80 \times 80 \text{ cm}$ großes Testfeld mit weißem Hintergrund ($\rho_H = 85 \%$) und einer mittig fixierten dunklen Graukarte ($\rho_0 = 6,5 \%$) in der Größe $30 \times 30 \text{ cm}$ in 30 m Entfernung zu den Messgeräten senkrecht auf der Photometerbahn eines Dunkellabores (Temperatur $20^\circ \text{ C} \pm 1^\circ \text{ C}$) aufgestellt. Die Messkarte wurde von einer Glühlampe zur Variation der Beleuchtungsstärke auf der Messtafel in den Abständen 5 m , $6,5 \text{ m}$, $7,5 \text{ m}$, 9 m , 11 m , 15 m , 20 m , 25 m und 28 m beleuchtet. Die Lichtquelle befand sich nahe der optischen Achse zwischen Messgeräten und Tafel und war gegen die Messgeräte abgeschattet. Die Messungen fanden senkrecht zur Ebene der Tafel statt.

Gemessen wurde mit photopischer Bewertung entsprechend $V(\lambda)$ -Anpassung der Geräte. Im Falle der LMK 98-4 Color wurde ein Objektiv mit 25 mm Brennweite und entsprechender Fokuskorrektur verwendet. Abbildung 7.2 zeigt die resultierenden gemessenen Leuchtdichten in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke auf dem Testfeld. Jene wurde parallel zum jeweiligen Leuchtdichtewert an dessen Messpunkt senkrecht zur Messkarte in Richtung der Lichtquelle gemessen. Eine zusätzliche Prüfung zur Stabilität der Messwerte der LMK 98-4 Color mit zwei Messdistanzen von 60 m und 89 m und je 200 Aufnahmen bei 200 ms Integrationszeit ergibt folgende Abweichungen bei gegebener Normalverteilung der Messwerte nach Tabelle 7.2.

Tabelle 7.2: Übersicht Stabilität der mit der LMK 984 Color gemessenen Leuchtdichten.

Leuchtdichte	$\bar{L} [\text{cd/m}^2]$	L_{med}	L_{max}	L_{min}	$L_{max} - L_{min}$	Standardabweichung s	Varianz s^2
Graukarte	$7,67 \cdot 10^{-3}$	0,007683	0,0082	0,007151	0,1369	$0,245 \cdot 10^{-3}$	$0,06 \cdot 10^{-6}$
Hintergrund, links	$73,68 \cdot 10^{-3}$	0,07365	0,07457	0,07286	0,0232	$0,42 \cdot 10^{-3}$	$0,176 \cdot 10^{-6}$
Hintergrund, rechts	$72,54 \cdot 10^{-3}$	0,07251	0,07345	0,07144	0,0273	$0,427 \cdot 10^{-3}$	$0,182 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 7.3: Unsicherheitsgrenzen für einzelne Merkmale und Gesamtunsicherheitsgrenzen für Leuchtdichtemessgeräte der Klassen A und B entsprechend [DIN 1985, S. 2] sowie äquivalente Unsicherheitsgrenzen des Leuchtdichtemessgerätes.

Merkm ^{al}	Bezeichnung DIN 5032	Klasse A	Klasse B	Leuchtdichte- messgerät	LS2000	LMK 98-4 Color ²²
V(λ)-Anpassung	f_1	3 %	6 %	3 %		< 4 %
UV-Empfindlichkeit	u	1 %	2 %	1 %		-
IR-Empfindlichkeit	r	1 %	2 %	1 %		-
räumliche Bewertung	f_2 (g)	3 %	6 %	3 %		< 0,5 %
Einfluss der Umfeldleuchtdichte	f_2 (u)	1,5 %	2 %	1,5 %	< 2 %	< 2 %
Linearitätsfehler	f_3	1 %	2 %	1 %		< 0,5 %
Fehler des Anzeigege ^r ätes	f_4	3 %	4,5 %	3 %		-
Ermüdung	f_5	0,5 %	1 %	0,5 %		-
Temperaturkoeffizient	α_0, α_{25}	0,2 %/K	1 %/K	0,2 %/K		-
moduliertes Licht	f_7	0,2 %	0,5 %	0,2 %		-
Polarisationsfehler	f_8	1 %	2 %	1 %	< 3 %	-
Abgleichfehler	f_{11}	0,5 %	1 %	0,5 %		-
Fokussierfehler	f_{12}	1 %	1 %	1 %		korriger- bar
Gesamtfehler ²³	f_{ges}	7,5 % ²⁴	10 % ²⁵	7,5 % ²⁶		< 10 %
untere Grenzfrequenz	f_u	40 Hz	40 Hz	40 Hz		-
obere Grenzfrequenz	f_o	10 ⁵ Hz	10 ⁴ Hz	10 ⁵ Hz		-

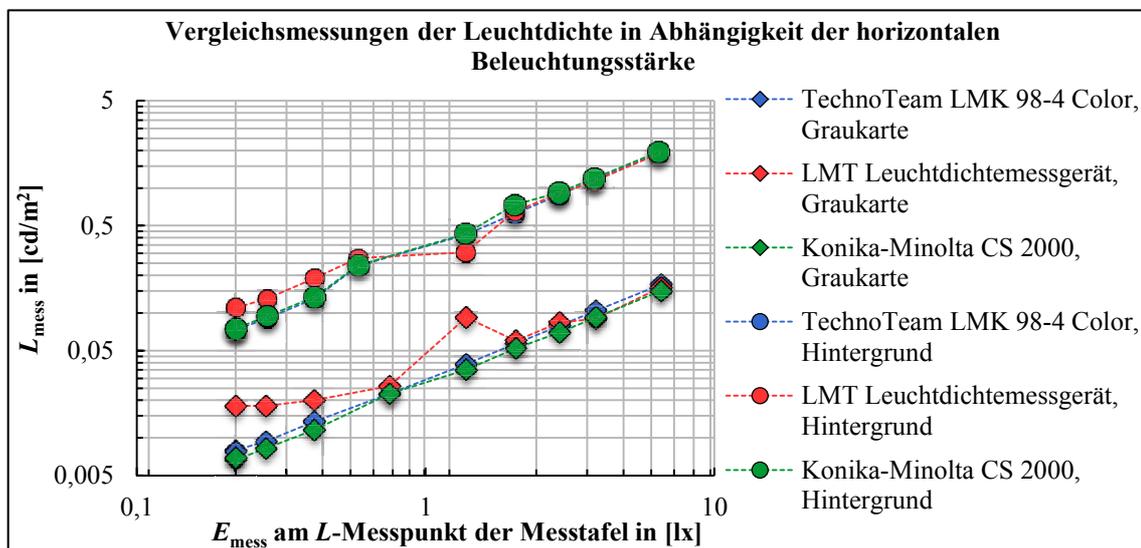


Abbildung 7.2: Vergleichsmessungen L-Kamera LMK 98-4 Color mit kalibrierten Instrumenten zur Bestimmung von Leuchtdichten < 2 cd/m² (Hintergrund) und < 0,2 cd/m² (Graukarte).

²² Entsprechend Kalibrierschein zur Leuchtdichtekamera LMK 98-4 Color der Firma TechnoTeam Bildverarbeitungs GmbH vom Februar 2009 [TECHNOTEAM BILDVERARBEITUNGS GMBH 2009]. Weitere Angaben siehe Kalibrierschein.

²³ „Beim Gesamtfehler ist die Unsicherheit des beim Kalibrieren verwendeten Normals (nach Prüfschein) eingeschlossen (siehe auch Kalibrierbedingungen nach DIN 5032-Teil 6)“ [DIN 1985, S. 2].

²⁴ „Summe der Werte f_1, u, r, f_2 (g), f_2 (u), $f_3, f_4, \alpha \cdot 10 \text{ K}, f_5, f_7, f_8, f_{11}, f_{12}$ zzgl. Kalibrierunsicherheit des Normals“ [DIN 1985, S. 2].

²⁵ Ebenda.

²⁶ Ebenda.

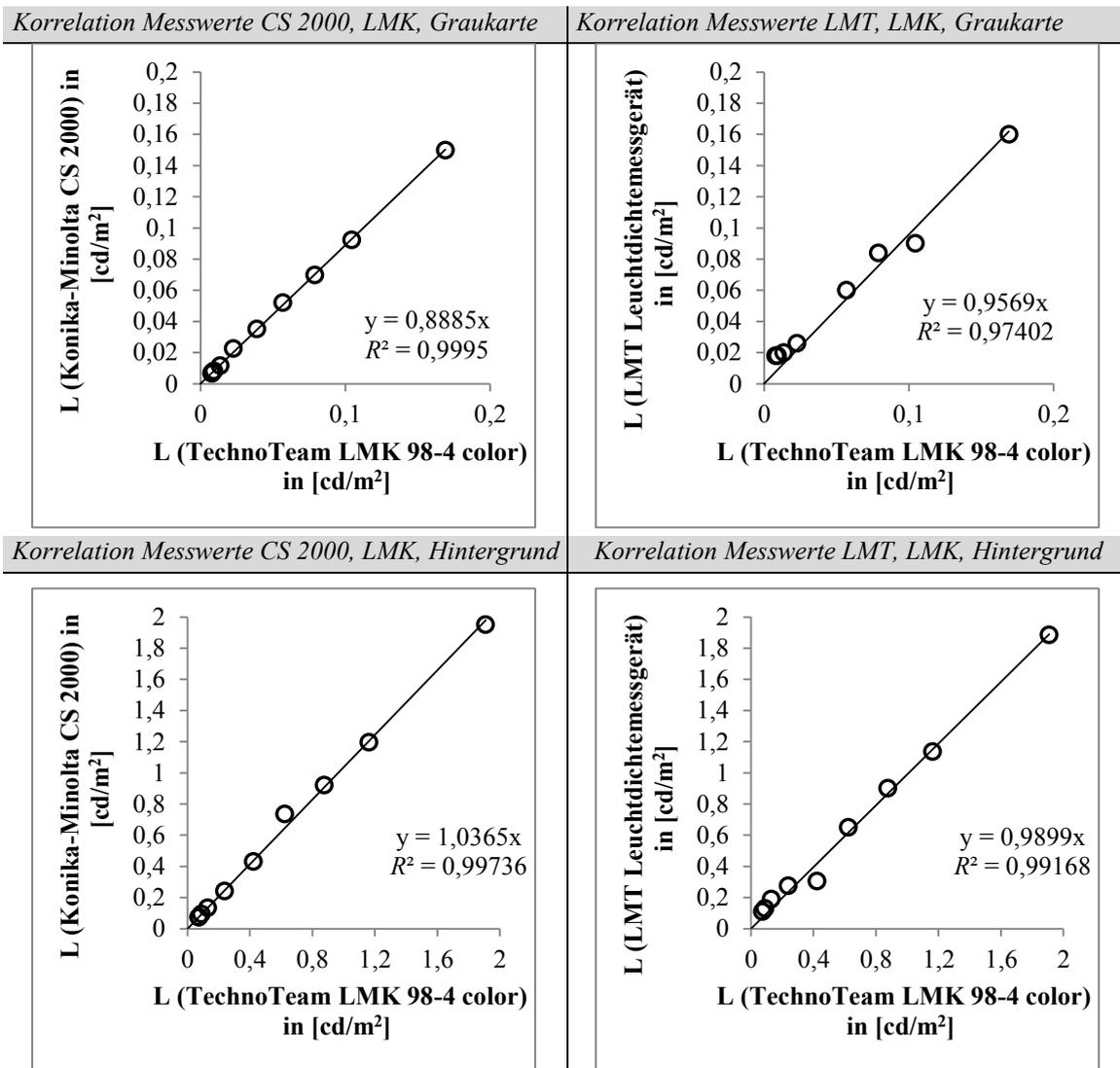


Abbildung 7.3: Korrelation der Messgeräte untereinander.

Diese Resultate implizieren, dass bei sachgemäßer Handhabung von Kamera und Messsoftware eine zulässige Gesamtunsicherheit ortsaufgelöster Leuchtdichtemesstechnik mit digitaler Bildverarbeitung in Höhe von 10 % auch bei den niedrigen Leuchtdichten des Laborversuchs nicht überschritten werden. Weiterführende Literatur hierzu findet sich in bieten FISCHBACH & SCHMIDT [1999], FISCHBACH [1998] sowie FISCHBACH & KRÜGER [1998].

Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9740$ bis $R^2 = 0,9995$ besteht für die gegenübergestellten Stichproben eine sehr hohe Korrelation, so dass von einer sehr guten Vergleichbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Messgeräte ausgegangen werden kann. Dies gilt insbesondere für die Messwerte der Leuchtdichtekamera, jedoch nur dann, wenn die Reliabilität der Messung bezüglich Positionierung und Ausrichtung Kamera sichergestellt ist. Da die Messfelder je Szene mittels digitaler Bildverarbeitung individuell neu bestimmt werden, das Kamerastativ fest positioniert ist und der Beobachterwinkel ebenfalls fix ist, ist nicht zu erwarten, dass hinsichtlich der Reliabilität der Positionierung relevante Messunsicherheiten entstehen.

7.3.5 VERWENDUNG EINFACHER SEHOBJEKTE ZUR KONTRASTBESTIMMUNG

Untersuchungen, die sich mit Erkennbarkeit einfacher Sehobjekte beschäftigen sind allgemein kritisch zu sehen. Die Abbildung realer Sehobjekte wie Fußgänger, Radfahrer, kleine Kinder, Tiere und anderer komplexer Sehobjekte mithilfe von Grautafeln verschiedener Reflexionsgrade ist nur im stark eingegrenzten Maße möglich (siehe auch [VÖLKER 2006, S. 202]). Verschiedene Untersuchungen [u. a. VÖLKER 2006, S. 159–169, 202] zeigen, dass Graukarten als einfache Sehobjekte zwar Hinweise auf die Erkennbarkeit realer Sehobjekte geben können, oftmals jedoch kein signifikanter Zusammenhang hinsichtlich der Detektion realer und einfacher Sehobjekte besteht.

Es ist allerdings nicht Ziel dieser Arbeit zu validieren, welche Sehobjekte sich besonders gut für Bestimmung von Erkennbarkeiten eignen. Die Einflüsse der Komplexität des Sehobjektes auf das Verfahren der Optimierung von LVK und den Vergleich der Optimierungsziele werden so gering wie möglich gehalten. Die Betrachtung der Erkennbarkeit mittels einfacher grauer Sehobjekttafeln ist dabei die mit der geringsten Unsicherheit. Die für die Validierungen herangezogene Graukarte wies keine vollkommen diffuse Reflexionscharakteristik auf, obwohl jene den Berechnungen der Optimierungen und den Auswertungsprogrammen zugrunde liegt. Selbiges gilt für die Homogenität des Reflexionskoeffizienten über die Fläche der Graukarte hinweg. Bei der Überprüfung des Reflexionsgrades der Graukarte mit der Ulbrichtschen Kugel variierte dieser zwischen 6,27 % und 6,56 %. Der aus den gemessenen Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken errechnete Reflexionsgrad schwankte bei der Überprüfung zur Messunsicherheit der Leuchtdichtekamera (siehe Kapitel 7.3.4), abhängig von der Szene von > 4 % bis < 15 %. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von FRANKE [2012, S. 68] zum Vergleich der *VL*-Bewertung mit Feldmessungen aus Kapitel 7.2.5, welche auf die Unsicherheit bei den real verwendeten Sehobjekten eingehen. Da eine Mittelung über die Fläche des Sehobjektes stattfindet, belaufen sich die resultierenden Auswirkungen dieser Schwankungen auf die Unsicherheit der Bestimmung des Kontrastes in Abschnitt 7.3.4 auf eine maximale Unsicherheit von circa 3 %.

7.3.6 UNSICHERHEIT DECKSCHICHT

Die Deckschichten des Laborversuches wurden im Wahrnehmungslabor/Lichttechnik des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der Technischen Universität Dresden vermessen. Die Angaben der Messunsicherheit bei der Bestimmung der *r*-Tabellen und Deckschichtkennzahlen basieren auf Angaben des Labors [SCHULZE 2014]. Vergleichsmessungen mit anderen Messstellen haben unter Anwendung des Näherungsverfahrens q_0 -Range nach FGSV/Range [SCHULZE 2014] mit zwei definierten Anleucht winkeln Abweichungen bis zu 0,015 cd/m² ergeben. Aufgrund weiterer Einflüsse über das Näherungsverfahren hinaus, wie z. B. Schwankungen bei Positionierung der Vergleichsprobe, können typische Fahrbahndeckschichtproben eine große Schwankungsbreite von bis zu 20 % aufweisen. Das zur Anwendung gekommene Leuchtdichtemessgerät der Firma LMT weist die Fehlerklasse A gemäß DIN 5032, Teil 7 [DIN 1985] auf. Die Schwankung des Lichtstromes der verwendeten Beleuchtungsquelle der Normlichtart A beträgt über den Verlauf einer Messung < 0,5%. Weitere Messunsicherheiten bei der Bestimmung der Fahrbahndeckschichteigenschaften treten, hinsichtlich Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Bestimmung von q_0 , aus den durch die Messung bestimmten *r*-Tabellen auf. Hier treten Abweichungen im Bereich < 2 % von q_0 auf. Die Reproduzierbarkeit der Winkelgenauigkeit beim Anfahren mittels Goniophotometer liegt bei circa 0,01°. Dies gilt

ebenfalls für die Replizierbarkeit der Orientierung der Probe gegenüber der Messanordnung. Daher können Winkelunsicherheiten als vernachlässigbar gering angenommen werden. Die Gesamtunsicherheit bei der Bestimmung der Reflexionscharakteristik der Probe des verwendeten Laborteppichs wird somit mit $< 22,5\%$ beziffert.

7.3.7 UNSICHERHEIT BESTIMMUNG REFLEXIONSGRAD

Der Sehobjektreflexionsgrad wurde ebenso wie Wand und Deckenreflexionsgrade des Versuchsraumes mit einer Ulbrichtschen Kugel des Typs RT 500 der Firma LMT Messgeräte GmbH gegen ein Keramik-Arbeitsreflexionsnormal gemessen. Die maximale Abweichung des im Kalibrierzertifikat angegebenen Reflexionsgrades des Normals beträgt $\pm 1\%$, die maximale Unsicherheit des $V(\lambda)$ Photometerkopfes f_1 nach DIN EN 13032-1 $1,7\%$ [DIN 2006].

7.3.8 UNSICHERHEIT STREULICHT

Umfangreiche Simulationen mit der Software Radiance [FULLER & MCNEIL 2013] in den Vorversuchen [FRAUENHOFER 2015] mit Wand- und Deckenreflexionsgraden von 5% haben die maximale Abweichung durch Streulicht auf $< 1,5\%$ beziffert. Der mit der Ulbrichtschen Kugel des Typs RT 500 gemessene Reflexionsgrad des Raumes beträgt 4% bis $4,5\%$. Die mögliche Unsicherheit, bedingt durch Streulicht, kann also auf $< 1,5\%$ beziffert werden.

7.3.9 GESAMTUNSICHERHEIT MESSUNGEN IM LICHTKANAL

Die Gesamtunsicherheit der Messungen im Lichtkanal ergibt sich aus den in Kapitel 7.3 diskutierten Einzelunsicherheiten und ist in Tabelle 7.4 aufgeführt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die maximale Abweichung nicht größer als die Summe der Einzelunsicherheiten ist. Da die Einzelunsicherheiten als unabhängig voneinander auftretend betrachtet werden können, rechtfertigt dies die Bildung der Gesamtunsicherheit mittels quadratischer Addition, welche eine Gesamtunsicherheit von maximal 25% als Fortpflanzung der Einzelunsicherheiten ergibt. Die Unsicherheiten für die Einstellung der Leuchte und des Streulichtes sind dabei berücksichtigt. Es sei an dieser Stelle jedoch angemerkt, dass der Laborversuch ausschließlich der Überprüfung der Möglichkeiten der technischen Realisierbarkeit der optimierten LVK dient.

Tabelle 7.4: Übersicht der Unsicherheiten bei den Messungen im Lichtkanal und deren resultierende Gesamtunsicherheit je Art der Messung.

	Maximaler Unsicherheitsbetrag Beleuchtungsstärken in [%]	Maximaler Unsicherheitsbetrag Leuchtdichten in [%]	Maximaler Unsicherheitsbetrag Visibility Level in [%]
Unsicherheit Goniophotometer	3	3	3
Unsicherheit Lux-Meter	10	-	-
Unsicherheit Leuchtdichtkamera	-	10	10
Streulicht	1,5	1,5	1,5
Reflexionseigenschaften Teppich	-	22,5	22,5
U-Kugel	-	-	2,7
Gesamtunsicherheit der maximalen Einzelunsicherheiten	10,55	24,85	25

8

DISKUSSION IM KONTEXT DES FORSCHUNGSFELDES

Bisher sind verschiedene Untersuchungsergebnisse zu den erzielten Lichtverteilungen ausgewählter multikriterieller Optimierungsmethoden hinsichtlich der Erkennbarkeit und weiterer lichttechnischer Qualitätskennzahlensysteme vorgestellt worden. In diesem Kapitel soll der Diskurs der betrachteten Methoden und ihrer Ergebnisse mit Forschungsarbeiten von thematischem Belang erfolgen.

Die aussagekräftige Diskussion der optimierten Lichtverteilungen kann nur erfolgen, wenn das jeweilige Optimierungsziel hinreichend erfüllt worden ist. Daher behandelt Unterkapitel 8.1 die Umsetzung der insgesamt definierten, einzelnen Optimierungsziele, insbesondere im Vergleich zu Optimierungsansätzen thematisch verwandter Arbeiten. Aufbauend darauf erfolgt hier auch ein Vergleich der Ergebnisse der Optimierungen hinsichtlich der Erkennbarkeit anhand ihrer Visibility Level (*VL*)-Verläufe nach den Forschungsfragen und Hypothesen, die in 3.1 für das Untersuchungsfeld U1 definiert wurden. Hierbei wird insbesondere auf den Abgleich der Ergebnisse mit den Forderungen relevanter wahrnehmungsphysiologischer Forschungen an die Erkennbarkeit in der Straßenbeleuchtung fokussiert.

Wie sich die untersuchten Optimierungsmethoden in unterschiedlichen Anlagengeometrien und bei unterschiedlichen Fahrbahndeckschichten hinsichtlich der *VL*-Verläufe verhalten (Untersuchungsfeld U2), wird in Unterkapitel 8.2 behandelt. Hier werden die Erkenntnisse aus Kapitel 5 den angrenzenden Forschungen zur Erkennbarkeit und LVK-Optimierung gegenübergestellt. Im Ergebnis werden die Rahmenbedingungen dargestellt, unter denen die untersuchten Methoden anwendbar sind.

Die Bewertung der Qualität der Straßenbeleuchtung anhand der in Kapitel 3.4 ausgewählten Qualitätskennzahlensysteme steht im Vordergrund von Unterkapitel 8.3. Die Aussagekraft und Spezifika dieser Kennzahlensysteme werden entsprechend den Forschungsfragen und Hypothesen aus Untersuchungsfeld U3 diskutiert.

Abschließend wird in Unterkapitel 8.4 erörtert, inwieweit bei gleichwertiger Erfüllung des jeweiligen Primärziels eine Minimierung des Lichtstromes entsprechend Untersuchungsfeld U4 durch Substitution der Optimierungsmethode erfolgen kann.

8.1 UMSETZUNG UND UNTERSUCHUNG OPTIMIERUNGSMETHODEN

8.1.1 UMSETZUNG DES PRIMÄRZIELS GLEICHMÄßIGKEIT DER BELEUCHTUNGSSTÄRKE

Das Erreichen vollkommen homogener Verteilungen horizontaler Beleuchtungsstärke ist für die untersuchten Beleuchtungssituationen aufgrund des direkten Zusammenhangs von Lichtstärken und Beleuchtungsstärken unkritisch. Das Optimierungsziel einer Gesamtgleichmäßigkeit von 100 % wird daher in allen untersuchten Beleuchtungssituationen erfüllt. Dies gilt ebenso für die vertikale Beleuchtungsstärke. Für diese beiden Optimierungsziele wird daher Forschungsfrage F1.a nach der Erfüllung des Optimierungsziels positiv beantwortet.

Die vorgestellten Ergebnisse zur Erkennbarkeit zeigen, dass weder die gleichmäßige Verteilung der vertikalen Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte noch die VL -Optimierung derart hohe VL erzielen wie die gleichmäßige Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke. Selbst bei hohen Sehobjektreflexionsgraden werden VL_i erreicht, die weit im zweistelligen Bereich liegen. Die helleren Sehobjekte stellen im Gegensatz zu den anderen Optimierungen hier auch kein Problem dar. Sie werden in der beobachtbaren Hälfte des Bewertungsfeldes aufgrund der dort dominanten Anstrahlung umso besser erkannt. Umgekehrt bewirkt die deutliche Silhouette in der zweiten Bewertungsfeldhälfte durchgehend VL -Werte von $|VL_i| > 4,7$. Unweigerlich entsteht in der Mitte des Bewertungsfeldes eine Kontrastumkehr, welche die Einhaltung der elementaren Forderung zur Vermeidung von $|VL_i| < 1$ in allen untersuchten Fällen verhindert. Die $U_o(E_{ver})$ -Optimierung erzielt dahingegen gleichmäßige VL -Verläufe, deren Niveau maßgeblich von Sehobjektreflexionsgrad (siehe Abschnitt 8.2.1). und Mastabstand (vgl. Abbildung 5.16) abhängt. Kritische Erkennbarkeiten von $|VL_i| < 1$ können jedoch hier nicht immer vermieden werden. Arbeitshypothese H1.b wird damit für diese Optimierungsmethoden bestätigt. Forschungsfrage F1.b muss für die $U_o(E_{hor})$ -Optimierung mit „nein“ beantwortet werden, da sie keine schlechten Erkennbarkeiten vermeidet. Bei der $U_o(E_{ver})$ -Optimierung hängt die hinreichende Vermeidung schlechter Erkennbarkeiten von der Wahl der Beleuchtungsinstallation und des zur Bewertung herangezogenen Sehobjektes ab.

8.1.2 UMSETZUNG DES PRIMÄRZIELS GLEICHMÄßIGKEIT DER LEUCHTDICHTE

Für die Optimierung auf eine homogene Fahrbahnleuchtdichte werden sowohl die Reflexionseigenschaften der Fahrbahndeckschicht als auch die festsgelegte Begrenzung der Schwellenwerterhöhung auf $TI < 15$ berücksichtigt. Dadurch werden bei der untersuchten einseitigen Leuchtenanordnung nicht immer vollkommen homogene Leuchtdichteverteilungen erzielt. Ab Lichtpunktabständen von $S_{rel} = 1 : 5$ kann die Blendungsbegrenzung schließlich nur in Ausnahmefällen eingehalten werden (siehe Abbildung 5.36).

Die innerhalb der Arbeit erzielten Gesamt- und Längsgleichmäßigkeiten liegen im Bereich von $0,62 < U_{o,L} < 0,92$ bzw. $0,87 < U_{l,L} < 0,93$. Dies übertrifft die nach den Erkenntnissen von WALTHERT [1973] und ADRIAN & WALTHERT [1975, S. 10] benötigten Mindest- U_l einer von Beobachtern als homogen empfundenen Fahrbahnausleuchtung bei Weitem. In thematisch angrenzenden Arbeiten von Enzmann und Eberbach wurden ebenfalls hohe Gleichmäßigkeiten von $0,44 < U_{o,L} < 0,96$, $0,88 < U_{l,L} < 0,97$ bzw. $0,76 < U_{l,L} < 0,90$ erzielt, wobei erhöhte Blendung und kurze Lichtpunktabstände $S_{rel} = 1 : 2$ in Kauf genommen werden mussten. Auch Optimierungen von Wassilev erzielen ähnlich gleichmäßige Leuchtdichteverteilungen [EBERBACH 1973; ENZMANN 1977; WASSILEV 1982]. Die erzielten optimierten Leuchtdichte-

verteilungen werden dementsprechend als homogen angesehen, so dass Forschungsfrage F1.a zur Erfüllung dieses Optimierungsziels positiv beantwortet ist.

Bei geringem Querversatz zwischen Spurmittle und Lichtpunktreihe gewährleistet die $U_o(L)$ -Optimierung durchgehend unkritische Erkennbarkeiten unabhängig von allen untersuchten Einflüssen. Die Mediane und Mittelwerte des VL liegen dabei im mittleren bis hohen einstelligen Bereich. Forschungsfrage F1.b nach der Vermeidung schlechter Erkennbarkeiten kann also positiv beantwortet werden. Hypothese H1.b kann für die Leuchtdichte nicht widerlegt werden und H1.c wird bestätigt anhand der Argumentation, dass die $U_o(L)$ -Optimierung im Gegensatz zur $U_o(E_{hor})$ -Optimierung kritische VL vermeidet. Eindeutige Effekte, die H1.e belegen würden, nach welcher die $U_o(L)$ -Optimierung schlechtere Verläufe bewirkt als die E_{ver} -Optimierung, sind nicht nachweisbar.

8.1.3 UMSETZUNG DES PRIMÄRZIELS GUTE ERKENNBARKEIT

Das hier definierte Ziel der VL -Optimierungsmethode ist es, unter Anwendung des Silhouetten-Prinzips kritische $|VL_i| < 1$ zu vermeiden und zugleich unter den gegebenen Randbedingungen gute $|VL_i|$ -Werte über das gesamte Bewertungsfeld bereitzustellen.

Für Objekte mit einem Reflexionsgrad $\leq 20\%$ und $S_{rel} \leq 1:4$ werden mit $|VL|_{min} \geq 1,12$ (Fahrspur 0) und $|VL|_{min} \geq 2,34$ (Fahrspur 1) erzielt und damit kritische Erkennbarkeiten vermieden. Beim Sehobjektreflexionsgrad von 40% können $|VL_i| < 1$ kaum umgangen werden. Somit kann Forschungsfrage F1.b nach der Vermeidung schlechter Erkennbarkeiten nur abhängig vom entsprechenden Reflexionsgrad beantwortet werden.

Gleichzeitig umfassen die erzielten Mittelwerte einen Bereich von $|\overline{VL}| \geq 3,29$ bis $|\overline{VL}| \geq 8,19$ (Spur 0) und $|\overline{VL}| \geq 5,73$ bis $|\overline{VL}| \geq 9,04$ (Spur 1) bei Niveaus $0,71 \text{ cd/m}^2 \leq \bar{L} \leq 0,84 \text{ cd/m}^2$.

Werte angrenzender Arbeiten WASSILEVS [1982] und ENZMANNS [1977]²⁷ liegen in einem Spektrum von $|VL_i| (\rho_o = 0,05) < 8$ und $|VL_i| (\rho_o = 0,45) < 5$ mit vielen kritischen $|VL_i| (\rho_o = 0,45) < 1$ [vgl. WASSILEV 1982, S. 131 ff.] bis hin zu $\overline{VL}_{max} > 15$. Die hier angewandte Optimierungsmethode unterscheidet sich in ihrer Strategie von diesen $|\overline{VL}|$ -Optimierungsansätzen. Sie streben mittels hoher Leuchtdichtegleichmäßigkeit oder direkter VL -Optimierung an, einen möglichst hohen Mittelwert des VL zu erreichen²⁸. Die Vermeidung lokaler Einbrüche des VL ist allerdings nicht einbezogen.

Ähnlich der hier untersuchten Methode optimierten STEFANOV & VASILEV [2009], mit der Randbedingung, dass kein $|VL_i| < 1,05$ sein darf, mit der Berechnungsgrundlage nach ANSI IESNA RP 8-00, direkt auf das $STVL$. Die einzelnen VL_i und \overline{VL} ähneln den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit bei einem Leuchtdichteniveau von $0,6 \text{ cd/m}^2 \leq \bar{L} \leq 0,8 \text{ cd/m}^2$ und einem $S_{rel} = 1:4,3$. Es gelingt ihnen jedoch nicht, unter Vermeidung kritischer $|VL_i| < 1$ gültige LVK-Lösungen zu erzielen. Die resultierenden $STVL$ von knapp 3 bis knapp 5 übertreffen allerdings gängige $STVL$ -Niveaus [vgl. STEFANOV & VASILEV 2009, S. 1219].

²⁷ Das Ziel der Arbeit von Enzmann war, von vorgegebenen physiologischen Erfordernissen der Qualitätskriterien auszugehen und eine Lichtstärkeverteilung bzw. Beleuchtungseinrichtung zu entwerfen, die für die erforderliche Schaufgabe ein Optimum darstellt (vgl. Enzmann 1977, Seite 5).

²⁸ Im Falle Enzmanns lediglich nach graphischer Auswertung über Kurven gleich hoher mittlerer Leuchtdichte, gleicher Blendung und gleicher Gleichmäßigkeit [ENZMANN 1977, S. 37 ff.].

Das angestrebte Ziel der Optimierungen wird sowohl anhand der Forderung nach der Vermeidung $|VL_i| < 1$ als auch hinsichtlich der Bereitstellung guter $|VL_i|$ -Werte erfüllt. Forschungsfrage F1.a kann hier unter Berücksichtigung der angeführten Ausnahmen mit „ja“ beantwortet werden.

Da somit für alle herangezogenen Optimierungsmethoden F1.a positiv beantwortet ist, wird Arbeitshypothese H1.a, nach welcher für alle Optimierungsmethoden die angestrebten Ziele sinnvoll erfüllt werden, ebenfalls belegt. Somit ist die Grundlage für eine Beantwortung von F1.b und F1.c gegeben. Neben der ausführlichen Darstellung der Ergebnisse in Kapitel 5 bietet Abbildung 5.19 eine Übersicht über die insgesamt erzielten VL . Es ist offensichtlich, dass die $U_o(E_{hor})$ -Optimierung stets über weite Bereiche des Bewertungsfeldes die besten VL_i erzielt. Sie kann hinsichtlich F1.b jedoch keine kritischen VL vermeiden und wird daher nicht zur Beantwortung der F1.c herangezogen. Bei den anderen Optimierungsmethoden erfolgt dies abhängig von der Beleuchtungsinstallation. Insgesamt vermeiden L - und VL -Optimierung am besten kritische VL mit einem leichten Vorteil für die VL -Optimierung, so dass sie entsprechend F1.c das Ranking anführen. Hinsichtlich Hypothese H1.d gilt, dass die VL -Optimierung ähnlich gleichmäßige VL -Verläufe bereitstellt wie die L -Methode. Hier lassen sich keine eindeutigen Favoriten ableiten. Herausragende Ergebnisse entsprechend Forschungsfrage F1.d stellt die hier untersuchte Variante der VL -Optimierung somit nicht bereit.

8.1.4 EINHALTUNG DER BLENDUNGSBEGRENZUNG

Bei der $U_o(E_{hor})$ -Optimierung wird die Blendung durch die Beschränkung der Lichtverteilung auf die Bewertungsfläche im jeweils halben Lichtpunktastand und die so bedingte Vermeidung flacher Abstrahlwinkel erfolgreich begrenzt. Die TI -Werte liegen für alle untersuchten Fahrbahndeckschichten deutlich unter 15.

Da bei der $U_o(E_{ver})$ -Optimierung keine TI -Begrenzung implementiert ist, liegen hier (siehe Übersicht in Abbildung 5.36) die TI -Werte deutlich über 20, so dass die Betrachtung der Erkennbarkeitsverläufe und der anderen Qualitätskennzahlen mit großer Vorsicht zu sehen sind. Dies stellt Hypothese H1.e stark in Frage. Denn selbst wenn die VL -Verläufe dieser Optimierungsmethode gute Erkennbarkeit prognostizieren würden, so führt die stark erhöhte Blendung doch zu einer zu großen Wahrnehmungseinschränkung. Daher sollte eine Optimierung auf die gleichmäßige vertikale Beleuchtungsstärke nicht als Alternative zur Leuchtdichtemethode gesehen werden.

Bei der L - und VL -Optimierung zeigt das Verwerfen der implementierten TI -Begrenzung bei großen Mastabständen die Anlagengeometrie bedingten Grenzen der Randbedingung auf. Hier führen zu hohe Lichtstärken unter flachen Abstrahlwinkeln zu erhöhter Blendung.

8.1.5 VERGLEICH ERGEBNISSE UND WAHRNEHMUNGSPHYSIOLOGISCHE FORDERUNGEN

Um die Qualität der Erkennbarkeit zu beurteilen, müssen die Ergebnisse mit den Forderungen wahrnehmungsphysiologischer Untersuchungen zur Erkennbarkeit in vergleichbaren Beleuchtungssituationen abgeglichen werden. Um eine angemessene Erkennbarkeit zu gewährleisten, werden darin, entsprechend Unterkapitel 2.2.5, komplexitätsabhängig hohe, einstellige bis niedrige zweistellige Mindest- VL_{min} -Beträge gefordert. Diese Werte werden nach den Abschnitten 8.1.1 bis 8.1.3 von keiner untersuchten Optimierungsmethode durchgehend erzielt – selbst mit der VL -Optimierung nicht. Die erzielten $|VL|_{min}$ sind in Abbildung 5.16

zusammengefasst. Von fast keiner der U_o -orientierten Optimierungen werden $|VL|_{\min} \geq 7$ erzielt; die meisten Szenen, insgesamt, auch bei VL -Optimierung, weisen Beträge deutlich unter 7 auf. Die Mittelwerte und Mediane überschreiten einen Betrag von 8 kaum.

Offensichtlich liegt hier eine starke Diskrepanz zwischen wahrnehmungsphysiologischen Anforderungen unter Laborbedingungen und praktischer Realisierbarkeit guter Erkennbarkeit anhand des VL für den gesamten Straßenverlauf vor. Unumstritten und umsetzbar ist allerdings die Forderung, dass einzelne VL -Beträge kleiner 1 zu vermeiden sind.

8.2 BELEUCHTUNGSINSTALLATION UND BEOBACHTUNGSFORM

8.2.1 EINFLUSS DES SEHOBJEKTRREFLEXIONSGRADES AUF DIE ERKENNBARKEIT

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen umfassend, dass sich die Erkennbarkeit mit zunehmendem Reflexionsgrad des Sehobjektes verschlechtert (vgl. Abbildung 5.15 und Abschnitt 5.2.5). Im Einzelnen gilt bei dunkleren Reflexionsgraden ($\rho \leq 10\%$) $\overline{VL} < -5$ (dynamische Beobachtung) bzw. $\overline{VL} < -3$ (statische Beobachtung). Bei helleren untersuchten Sehobjektreflexionsgraden ab 20% kommt es, je nach Situation, zu Kontrastumkehr und demzufolge teils ausgedehnten Tarnzonen mit $|VL| < 1$ (vgl. Abbildung 5.19). Bei Sehobjekten noch höheren Reflexionsgrades (40%) lassen sich, wie auch bei ENZMANN [1977] und STEFANOV & VASILEV [2009] kaum noch akzeptable Verläufe mit $|VL_i| \geq 1$ erzielen.

Für die VL -Minima der $U_o(E_{\text{ver}})$ -Optimierung und der VL -Optimierung nimmt die Erkennbarkeit mit sinkendem Sehobjektreflexionsgrad zu (vgl. Abschnitt 5.2.3.1). Es ist also so, dass es nicht nur für gleichmäßigkeitsorientierte Optimierungsmethoden eine Herausforderung ist, für alle Reflexionsgrade eine optimale Erkennbarkeit bereitzustellen, sondern dass selbst eine individuelle Optimierung für bestimmte Reflexionsgrade, im Falle des Silhouetten-Prinzips bei helleren Sehobjekten, nicht immer gute Erkennbarkeiten erzielt.

Der gegenläufige Verlauf der erzielten VL zum Sehobjektreflexionsgrad deckt sich mit den Erkenntnissen der Forschungen von Wassilev ($|VL_i|$ ($\rho_o = 0,05$) < 8 , $|VL_i|$ ($\rho_o = 0,45$) bis 5, oftmals jedoch unter 1) [vgl. WASSILEV 1982, S. 131, 133]. Ähnliche $|VL_i|$ ($\rho_o = 0,20$) < 8 mit Kontrastumkehr bei $U_{l,L} = 0,7$ und $\bar{L} = 0,5 \text{ cd/m}^2$ erhalten auch DIJON & MALDAQUE [1997, S. 51] und DIJON & JUSTIN [1998]. GÜLER ET AL. [2003, S. 203-213] zeigen zudem, dass in der Praxis, trotz angemessener ANSI IESNA RP 8-00- und CIE-konformer Gleichmäßigkeiten sowie sogar zweistelliger \overline{VL} -Werte, dennoch $|VL_i| < 1$ auftreten.

Die erzielten $STVL$ -Werte nach Tabelle 5.3 weisen auf eine Zunahme der $STVL$ mit sinkendem Sehobjektreflexionsgrad für Objekte $\rho_o \leq 40\%$ bei homogener Leuchtdichtevertelung hin. Zum Vergleich:

$$\begin{array}{ll} STVL_{L, \text{opt}}(\rho_o = 6,5\%) = 8,66 & STVL_{L, \text{opt}}(\rho_o = 10\%) = 7,95 \\ STVL_{L, \text{opt}}(\rho_o = 20\%) = 5,72 & STVL_{L, \text{opt}}(\rho_o = 40\%) = 2,97 \end{array}$$

($S_{\text{rel}} = 1 : 3$, R3-Deckschicht, dynamische Beobachtung).

Diesen Zusammenhang zeigen auch Ergebnisse von KECK & VICKSBURG [1993, S. 45] mit

$$\begin{array}{ll} STVL(\rho_o = 0\%) \approx 10,5 & STVL(\rho_o = 10\%) \approx 8,0 \\ STVL(\rho_o = 20\%) \approx 5,0 & STVL(\rho_o = 40\%) \approx 2,3 \end{array}$$

($U_{0,L} = 0,71$, $\bar{L} = 1 \text{ cd/m}^2$, $L_{\min} = 0,71 \text{ cd/m}^2$, $S_{\text{rel}} = 1 : 3$, beidseitig versetzte Anordnung, R3-Deckschicht, dynamische Beobachtung). Für Sehobjekte mit Reflexionsgraden von 20 % oder 40 % die $STVL$ oder \bar{VL} sind die zuvor diskutierten wahrnehmungsphysiologischen Forderungen demnach kaum zu erfüllen. Für die durchgängig silhouettenbasierten Optimierungsmethoden gilt daher nach den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.2.5, dass es entsprechend Hypothese H2.a ab einen kritischen Sehobjektreflexionsgrad nicht mehr möglich ist, hinreichend gute Erkennbarkeiten bereitzustellen.

8.2.2 EINFLUSS DER STRAßENDECKSCHICHT AUF DIE ERKENNBARKEIT

Der Einfluss der Reflexionseigenschaften von Deckschichten auf die Erkennbarkeit wurde außerhalb dieser Arbeit im Zusammenhang mit optimierten Lichtverteilungen bisher kaum untersucht. Er wird in den Abschnitten 5.2.3.2 und 5.2.5 sowie 5.3.3.2 und 5.3.4 hinsichtlich der erzielten VL -Verläufe beschrieben.

Bei den Optimierungsmethoden nach homogener horizontaler und vertikaler Beleuchtungsstärke findet keine Berücksichtigung der Deckschichteigenschaften statt. Daher treten hier die stärksten lokalen Abhängigkeiten der resultierenden VL -Verläufe von der Deckschicht auf. Die VL_i -Werte (nicht Beträge!) nehmen bei E_{hor} vor allem im Bereich der direkten Anstrahlung der Objekte zu, da in deren unmittelbarem Umfeld weniger Licht zum Beobachter reflektiert wird. Je gerichteter die Fahrbahndecke reflektiert, desto stärker fällt dieser Effekt aus, so dass hier für gleichmäßig verteilte horizontale Beleuchtungsstärke die besten Erkennbarkeiten erreicht werden. Dies gilt jedoch nicht bei den Ergebnissen der Optimierung auf vertikale Beleuchtungsstärke. Bei geringem Querversatz von Objekt und Lichtpunkten (Spur 1) verbessert sich die Erkennbarkeit bei gerichtet reflektierenden Deckschichten. Bei höherem Querversatz (Spur 0) erzielen dagegen diffuse Deckschichten bessere Ergebnisse. Die Unterschiede fallen so stark aus, dass die Voraussetzung für eine Optimierung auf vertikale Beleuchtungsstärke einen minimalen Querversatz, kleiner $\frac{1}{4}$ der Lichtpunkthöhe, zwischen der Achse von Beobachter und Sehobjekt zu den Lichtpunkten fordert.

Offensichtlich entspricht die Fahrbahndeckschichtcharakteristik der C1-Tabelle hinsichtlich der VL -Ergebnisse denen der R1-Deckschicht. Die für die C2-Deckschicht können jedoch nicht eindeutig einer der übrigen R-Deckschichten zugeordnet werden. Sie gleichen in Teilbereichen denen für R3 bzw. R4. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen von BODMANN & SCHMIDT [1989], nach welchen es innerhalb der Klassen R2 bis R4 zu mangelnder Differenzierbarkeit kommen kann und eine Zusammenfassung dieser Charakteristika in der C2-Klasse verlässlichere Voraussagen zulässt.

Bei der Leuchtdichteoptimierung wird der Einfluss der Fahrbahndeckschicht sehr gut kompensiert (vgl. Abschnitte 5.2.3.2 und 5.3.3.2). Bei geringem Querversatz von Lichtpunkt zu Beobachterachse (Spur 1) weichen die Verläufe für unterschiedliche Deckschichten nur selten um $|VL_i| > 2$ voneinander ab. Bei größerem Querversatz, wie auf der Beobachterachse von Fahrspur 0, liegen die Abweichungen teils um $|VL_i| > 5$. Bei den VL -Optimierungen fallen die Abweichungen noch geringer mit $|VL_i| < 2$ bei niedrigem Querversatz aus, ähneln jedoch den Abweichungen der Leuchtdichteoptimierung bei größerem Querversatz.

Bei beiden untersuchten Negativkontrast-Optimierungen erscheint der Hintergrund bei größerem Querversatz dunkler, da weniger Licht zum Beobachter hin reflektiert wird. Das

Objekt hebt sich daher weniger stark vom Hintergrund ab und es resultieren niedrigere VL_i . Bei zunehmend helleren Sehobjekten bewirkt dieser Effekt Kontrastverflachung.

Für die Praxis bedeutet dies, dass eine Orientierung der Lichtpunkte hin zu Fahrbahnmitte und Beobachterachse einen positiven Effekt auf die Erkennbarkeit von Sehobjekten haben kann und bei einseitigen Beleuchtungsanordnungen somit Leuchten mit hohem Überhang zu bevorzugen sind. Für Arbeitshypothese H2.b folgt, dass die Auswirkungen der Straßendeckschicht bei der Optimierung und der Bewertung von Lichtverteilungen berücksichtigt werden müssen.

8.2.3 EINFLUSS DES RELATIVEN MASTABSTANDES AUF DIE OPTIMIERUNGSERGEBNISSE

Die Vergrößerung des Lichtpunktabstandes wirkt sich nicht unmittelbar negativ auf die Erkennbarkeit aus. Abschnitt 5.2.3.3 und 5.3.3.3 zeigen die Ähnlichkeiten der gestreckten VL -Verläufe relativ zum Mastabstand. Dadurch werden allerdings auch Bereiche flacher Kontraste ausgedehnt. Jedoch nimmt die für die Blendung verantwortliche Schleierleuchtdichte im Auge, infolge der für große Mastabstände zwangsläufig höheren Lichtstärken, unter flachen Winkeln zu. Um gleichermaßen gute Gesamtgleichmäßigkeiten und Erkennbarkeiten bereitzustellen, sollte daher der Abstand der Lichtpunkte das Vierfache der Lichtpunkthöhe nicht überschreiten (vgl. Abschnitte 5.2.3.3, 5.3.3.3 und 5.4.2). Angesichts dieser Ergebnisse ist fraglich, ob Mastabstände größer der vierfachen Lichtpunkthöhe, wie sie in der Praxis gefunden werden [SCHADE ET AL. 2009; SCHADE ET AL. 2010; SCHADE & VÖLKER 2011], hinsichtlich der Erkennbarkeit sinnvoll oder vertretbar sind.

Dies bestätigt Arbeitshypothese H2.c und deckt sich mit Erkenntnissen aus den in Abschnitt 2.2.5 vorgestellten Untersuchungen von EBERBACH [1973, S. 133], ENZMANN [1977], KECK & VICKSBURG [1993] und Ménard [MÉNARD ET AL. 1994, S. 21]. Diese Erkenntnis beschreibt in Kombination mit dem gewonnenen Wissen aus den anderen Abschnitten des Unterkapitels 8.2 den Einfluss der Beleuchtungsinstallation auf die Erkennbarkeit zur Beantwortung von Forschungsfrage F2.b.

8.2.4 EINFLUSS DER BEOBACHTUNGSART ZUR BESTIMMUNG DER ERKENNBARKEIT

Die Erkennbarkeitsbewertung erfolgte entsprechend den Festlegungen aus Abschnitt 3.2.5²⁹ einerseits bei stationärer Beobachtung, kongruent zu den Untersuchungen von ADRIAN & ENZMANN [1971], WALTHERT [1973] und ADRIAN & WALTHERT [1975] und andererseits bei dynamischer Beobachtung, u. a. nach ADRIAN [ADRIAN 1993A; ADRIAN 1989; ADRIAN 1995; ADRIAN & GIBBONS 1993; ADRIAN ET AL. 1993], KECK [1993] und dem ANSI IESNA RP 8-00 [IESNA 2005]

Der Vergleich der Ergebnisse (vgl. Abschnitte 5.2.3, 5.2.4 und 5.3.3) zeigt, dass für die untersuchten Anlagengeometrien sehr ähnliche $|VL_i|$ -Verläufe beider Bewertungsmethoden resultieren. Unabhängig von der Optimierungsmethode fallen die Verläufe bei stationärer Beobachtung mit wachsendem Beobachtungsabstand im Vergleich zur dynamischen Beobachtung charakteristisch ab (siehe Abbildung 5.19). Der Effekt ist im Wesentlichen durch den mit steigender Beobachtungsentfernung verringerten Sehobjektwinkel bedingt. Dies führt zu einer Erhöhung der Unterschiedsschwelle. Weitere Effekte auf die Minimal-, Median- und

²⁹ Nach [GIBBONS 1997, S. 180-184] gelten beide Formen als international anerkannt, wobei sich die dynamische Beobachtung eher im amerikanischen Raum, die stationäre eher in Deutschland etabliert hat.

Mittelwerte der V_L -Verläufe durch die unterschiedlichen Beobachtungswinkel und herangezogenen Leuchtdichten konnten nicht isoliert werden.

Im Vergleich zur dynamischen ist die stationäre Beobachtung nach diesen Erkenntnissen als kritischer anzusehen und kann entsprechend Arbeitshypothese H2.d als eine Vereinfachung in der Praxis empfohlen werden. Wenn unter stationärer Beobachtung eine Beleuchtung die Qualitätsanforderungen an die Erkennbarkeit für ein gesamtes Bewertungsfeld erfüllt, gilt dies auch für dynamische Beobachtung. Im Falle akzeptabler Erkennbarkeit unter dynamischer Beobachtung kann zur Erkennbarkeit unter stationärer Beobachtung allerdings keine Aussage getroffen werden. Somit ist Forschungsfrage F2.a beantwortet.

Weiter führen die großen Beobachtungsentfernungen bei stationärer Beobachtung zu sehr flachen Beobachtungswinkeln. Im Extremfall kann es dazu kommen, dass der Beobachtungswinkel aus dem für die r -Tabellen definierten Bereich von $-1^\circ \pm 0,5^\circ$ gleitet. Dabei kann die projizierte Fläche zur Bestimmung der Untergrund- und Umfeldleuchtdichten teilweise oberhalb des Horizontes liegen. Dies zeigen exemplarisch die Laboruntersuchungen von Kapitel 6.4.

8.3 AUSSAGEKRAFT UND VERGLEICHBARKEIT WEITERER QUALITÄTSKENNZAHLENSYSTEME

Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei sehr gleichmäßigen Lichtverteilungen mit angemessenen Beleuchtungsniveaus durch Kontrastverflachung Bereiche schlechter Erkennbarkeit auftreten (vgl. Unterkapitel 5.2 und 8.1). Gleichmaßen bergen die zusammenfassenden erkennbarkeitsorientierten Kennzahlensysteme wie die \overline{VL} -, VL_{med} oder die $STVL$ -Bewertung das Risiko, den Effekt örtlicher Kontrastverflachung [CIE 2010A; CIE 1981A; CIE 1981B; IESNA 2005] zu vernachlässigen (vgl. Kapitel 5.4). Dieser Effekt wurde bereits von GÜLER ET AL. [2003, S. 207-213] und LECOCQ [1993, S. 108] hinsichtlich der Bewertung des $STLV$ in der Praxis exemplarisch nachgewiesen. Dies bestätigt sowohl Arbeitshypothese H3.a als auch H3.b.

Das Zusammenspiel aus hoher Gleichmäßigkeit und angemessenem Beleuchtungsniveau stellt eine Kompromisslösung für die Standardplanung in der Straßenbeleuchtung dar, deren Einschränkungen bei der Anwendung berücksichtigt werden müssen, da nicht zwingend eine durchgehend gute Erkennbarkeit daraus resultiert.

Eine Ergänzung zusammenfassender Kennzahlensysteme durch Minimalwerte oder Verläufe der Erkennbarkeit muss nach bereits vorliegenden und den hier gewonnen Erkenntnissen als notwendig angesehen werden. Der Vergleich der \overline{VL} und VL_{med} mit den $|VL|_{\text{min}}$ zeigt nämlich, dass gerade im Zusammenhang mit den V_L -Verläufen gleichmäßiger horizontaler Beleuchtungsstärke und den dagegen gesetzten Ergebnissen homogener Leuchtdichte, stark schwankende Verläufe mit hohen Maxima gegenüber insgesamt flacheren Verläufen ohne V_L -Einbrüche besser bewertet werden als nach dem Bewertungskriterium VL_i .

Ein weiterer Vergleich der Ergebnisse offenbart Unterschiede bei der Vermeidung von Blendung. In vielen Szenen größeren Lichtpunktabstandes tritt laut dem in der Leuchtdichteplanung verwendeten Schwellenwerterhöhungsfaktor TI eine stark erhöhte physiologische Blendung auf. Die Werte der zusammenfassenden, erkennbarkeitsorientierten

Kennzahlen mit integrierter Blendungsbewertung weisen hingegen uneingeschränkt gute Erkennbarkeit aus (vgl. Abschnitt 5.4.2).

Forschungsfrage F3.a, nach der Stringenz der Ergebnisse und Aussagen der untersuchten Bewertungsansätze zur Erkennbarkeit, muss negativ beantwortet werden. Dies gilt ebenso für F3.b, denn die verglichenen Kennzahlensysteme können kritische Erkennbarkeiten nicht immer ausreichend berücksichtigen.

Diese Erkenntnis deckt sich mit Feststellungen von ENZMANN [vgl. 1977, S. 97], dass das den zusammenfassenden Kennzahlen zugrunde liegende VL allein kein geeignetes Maß zur Beurteilung des Blendverhaltens einer Beleuchtungsanlage und dedizierte Blendungskennzahlen diesbezüglich aussagekräftiger seien. Er empfiehlt Gleichmäßigkeit, mittlere Leuchtdichte und Blendungsbegrenzung gegeneinander zu einem Gesamtergebnis abzuwägen [ENZMANN 1977, S. 99 f.].

8.4 BETRACHTUNG DES LICHTSTROMS ALS SEKUNDÄRES OPTIMIERUNGSZIEL

Alle untersuchten Optimierungsmethoden berücksichtigen den Lichtstrombedarf für eine LVK während der Berechnung. Inwieweit die Minimierung des Lichtstromes erfolgen kann, hängt von der Erfüllung des jeweiligen Primärziels ab. Ebenso lässt auch die erkenntbarkeitsorientierte Optimierungsmethode nur dann eine Optimierung auf das Sekundärziel minimaler Lichtstrom zu, wenn es mehrere Lösungen zur Erzielung des Primärzieles gibt. Diese Bedingung führt dazu, dass zum bisherigen Zeitpunkt keine Aussagen über Kompromisslösungen aus einer nahezu optimalen Erfüllung des Primärzieles und daraus resultierenden besseren Lösungen des Sekundärzieles vorliegen. Denn für alle untersuchten Beleuchtungsinstallationen resultiert eine exakte Lösung als bester Kompromiss zur Erfüllung des jeweiligen Primärzieles unter den ausschließlich hierfür definierten Randbedingungen. Dieser Fall liegt auch bei den Optimierungsmethoden von ENZMANN [1977] und WASSILEV [1982] vor. Bei der Optimierung auf eine zusammenfassende Qualitätskennzahl kann es eine Lösungswolke geben, aus der die ideale Kombination aus Primärziel und Sekundärziel ermittelt werden kann. Diesen Ansatz verfolgt die Arbeit von STEFANOV & VASILEV [2009]. Sie führt eine Lichtstärken- und somit Lichtstromminimierung bei gegebener Größe der Qualitätskennzahl durch, beschränkt sich jedoch ausschließlich auf das von ihnen vorgestellte Optimierungswerkzeug. Das gilt auch für die Untersuchungen von PACHAMANOV & PACHAMANOVA [2008], die sich ausschließlich mit der Verringerung des Lichtstromes im Vergleich zu Standardleuchten befassen. Eine gleichzeitige Optimierung auf die visuelle Qualität liegt hier nicht vor, da lichttechnische Anforderungen explizit vorgegeben werden.

Die in den vorliegenden Untersuchungen aus der bestmöglichen Erfüllung des Primärzieles resultierenden LVK lassen sich hinsichtlich ihres Gesamtlichtstroms miteinander vergleichen (siehe hierzu auch Abbildung 5.37 aus Unterkapitel 5.5). Die Ergebnisse zeigen, dass es hinsichtlich Forschungsfrage F4 nicht die eine Optimierungsmethode gibt, die die niedrigsten Lichtströme zur Erfüllung der Beleuchtungsaufgabe ergibt. Vielmehr sind es einzelne Kombinationen aus Reflexionscharakteristik der Deckschicht und Optimierungsmethode, die darüber entscheiden, wie effizient die Beleuchtung, gemessen am Lichtstrombedarf sein wird. Offensichtlich ist jedoch bei der Leuchtdichte- und Erkennbarkeitsoptimierung, dass mit der

Erhöhung des Grades der Spiegelung der Lichtstrombedarf regressiv ansteigt (vgl. Abbildung 5.37). Liegen Beobachter, Sehobjekt und Lichtpunkt nicht auf oder sehr nahe einer Vertikalebene, wird weniger Licht an der Deckschicht zum Beobachter hin abgelenkt. Das Sehobjekt erfährt weniger Hinterleuchtung, was zu kleinerem Untergrund, kleineren Umfeldleuchtdichten und somit zu kleineren Objektkontrasten führt. Es wird also mehr Licht benötigt, um die gleichen Leuchtdichten und damit Kontraste zu erzielen als bei Verwendung von Deckschichten mit größeren Diffusanteilen. Mit dem ausführlichen Vergleich der Reflexionseigenschaften beschäftigt sich auch die Arbeit von Köhler [KÖHLER 2011; KÖHLER & NEUMANN 2012].

Über die Abhängigkeit von der Reflexionscharakteristik der Deckschicht hinaus, wird der Lichtstrombedarf von LVK der *VL*-Optimierungsmethode auch durch die Wahl des der Optimierung zugrundeliegenden Sehobjektreflexionsgrades bestimmt. So zeigen die hier bestimmten Gesamtlichtströme, dass optimierte LVK zur Erzeugung einer kontrastreichen Silhouette tendenziell mehr Lichtstrom benötigen. Entsprechend Abbildung 5.37 und Tabelle A.31 auf Seite A-24 des Anhangs kann allerdings nicht festgestellt werden, dass die *VL*-Optimierung zu einem wesentlich niedrigeren Lichtstrombedarf führt, als die gleichmäßigkeitsorientierten Optimierungsmethoden.

9

ZUSAMMENFASSENDES FAZIT UND AUSBLICK

Kapitel 9 fasst die aus den Ergebnissen und der Diskussion abgeleiteten Erkenntnisse in Unterkapitel 9.1 als Fazit zusammen und schließt die Arbeit mit dem Ausblick in 9.2.

9.1 ZUSAMMENFASSENDES FAZIT

In dieser Arbeit wurden vier Methoden zur Optimierung von Lichtverteilungen auf das Qualitätsmerkmal Sicherheit identifiziert und anhand des Merkmals Erkennbarkeit mittels der Bewertungskennzahl Visibility Level (VL) verglichen. Sie stellen entweder homogene Verteilungen der Leuchtdichte, der horizontalen beziehungsweise der vertikalen Beleuchtungsstärke, bereit oder führen eine direkte Optimierung auf die orts aufgelösten VL durch. Alle Optimierungsansätze basieren ausschließlich auf der gezielten Manipulation von Lichtstärkeverteilungskörpern (LVK) mit Rücksicht auf einen niedrigen Lichtstrombedarf durch die Vermeidung unnötig hoher Beleuchtungsniveaus.

Der Vergleich der Erkennbarkeiten erfolgte durch Simulation und anhand eines Laborversuchs bei jeweils maximal möglicher Erfüllung des Optimierungsziels für typische Installationen mit einreihiger Leuchtenanordnung und Leuchtdichteniveaus von $0,44 \text{ cd/m}^2 \leq \bar{L} \leq 1,82 \text{ cd/m}^2$ unter Variation der Straßendeckschicht und des Mastabstandes.

Das Verbesserungspotential wurde mit Hilfe von VL -Verläufen, -Minima, -Medianen und -Mittelwerten bei unterschiedlichen Beobachtungsbedingungen analysiert. Vergleichend wurden in der Straßenbeleuchtung etablierte Kennzahlensysteme zur Bewertung der Sicherheit herangezogen.

Optimierungsmethoden

Die Ergebnisse (vgl. Kapitel 5) erweitern den Gültigkeitsbereich vorangegangener Untersuchungen (vgl. Kapitel 8) und bestätigen deren Erkenntnisse, dass sehr homogene Verteilungen von Beleuchtungsstärke oder Leuchtdichte bei niedrigen Beleuchtungsniveaus kein Garant für eine gute Erkennbarkeit sind. Anhand der ermittelten VL -Verteilungen werden mehrfach Zonen schlechter Erkennbarkeit und Kontrastumkehr nachgewiesen.

Insbesondere die gleichmäßige Verteilung horizontaler Beleuchtungsstärke (vgl. Abschnitte 5.2.3 und 5.2.4) verursacht, unabhängig vom Reflexionsgrad des Sehobjektes, von der Art der Straßendeckschicht und vom Mastabstand, Kontrastumkehr. So entsteht ein Zielkonflikt

zwischen der Forderung nach möglichst hohen VL und der unbedingten Vermeidung kritischer Erkennbarkeiten von $|VL_i| < 1$. Eine Optimierung auf die Homogenität der horizontalen Beleuchtungsstärke kann daher nur für Beleuchtungsinstallationen empfohlen werden, in denen die anderen untersuchten Ansätze keine angemessenen Erkennbarkeiten bereitstellen können; also, wenn eine leuchtdichte-basierte Planung aufgrund der Einschränkung der Mess- und Bewertungsvoraussetzungen nicht möglich ist (z. B. kurviger Straßenverlauf, zu kurzer Straßenabschnitt für das Anlegen eines Bewertungsfeldes).

Anhand der Anfälligkeit gegenüber der Verursachung starker Blendung ist die Optimierung auf eine gleichmäßig verteilte vertikale Beleuchtungsstärke, wie sie hier angewandt wurde, ausdrücklich nicht zu empfehlen, auch wenn sie situationsabhängig gute VL bereitstellen kann.

Homogene Leuchtdichteverteilungen (vgl. Abschnitte 5.2.3 und 5.2.4) vermeiden dagegen Kontrastverflachungen und -Umkehrungen in den meisten untersuchten Fällen erfolgreich. Sie ermöglichen gute Sichtverhältnisse für niedrige bis mittlere Sehobjektreflexionsgrade im Rahmen des Silhouette-Prinzips, sofern die vorgegebene Blendungsbegrenzung eingehalten wird. VL -Einzelbeträge im Bereich von meist 4 bis 8 bei Verwendung des 20 %-Sehobjektes zeugen von den guten bereitgestellten Erkennbarkeiten. Höhere Objektreflexionsgrade führen dagegen leicht zu ausgedehnten Bereichen schlechter Erkennbarkeit aufgrund verflachter Objektkontraste. Ein größerer Querversatz von Lichtpunktreihen zur Beobachtungsachse führt oft zu Erkennbarkeitseinbußen.

VL -optimierte Lichtverteilungen bieten insgesamt die meisten Beleuchtungssituationen mit akzeptablen VL -Ergebnissen, da hier Kontrasteinbrüche sowie Schwankungen im VL -Verlauf auch bei Querversatz der Leuchtenanordnung am besten verhindert werden. Meist können mit dem in Erkennbarkeitsuntersuchungen etablierten 20 %-Sehobjekt VL -Beträge im Bereich 5 bis 8 erzielt werden. Niedrigere Reflexionsgrade weisen entsprechend bessere Erkennbarkeiten meist $|VL| > 7$ auf. Das zugrunde liegende Silhouette-Prinzip führt bei helleren Objekten jedoch konzeptbedingt zu Bereichen verflachter Objektkontraste. Bei intakter TI -Limitierung bleibt die Blendung innerhalb des definierten Rahmens. Bei großen Lichtpunktabständen kann es hier ebenfalls zu erhöhten TI -Werten kommen.

Dabei ist unbedingt zu berücksichtigen, welche Diskrepanz zwischen den Forderungen angrenzender wahrnehmungsphysiologischer Arbeiten aus Unterkapitel 2.2.5 hinsichtlich geforderter Mindestwerte von $|VL| > 7$ bis zu $|VL| > 35$ und in der Praxis realisierbarer Erkennbarkeiten vorliegt. Dies mag am niedrigen Niveau der Beleuchtung liegen, welches für diese Arbeit verwendet wurde, sollte nach den in den Unterkapiteln 2.2.4 und 2.2.5 diskutierten wahrnehmungsphysiologischen Ansätzen jedoch auch für dieses gelten. Aus Sicht der Ergebnisse lässt sich ein Kompromiss empfehlen, nach welchem einzelne $|VL| < 1$ unbedingt vermieden werden sollten und ein Großteil der VL -Einzelbeträge bei Bewertung mittels der 20 %-Sehobjektes > 5 anzustreben sind, damit eine angemessene Sichtbarkeit gewährleistet ist.

Beleuchtungsinstallation

Gute Erkennbarkeitsverläufe können mit allen betrachteten Optimierungsmethoden nur bis zu einem bestimmten relativen Mastabstand realisiert werden, da die Blendung mit wachsendem Lichtpunktabstand zunimmt und bei einem Lichtpunktabstand der fünffachen Lichtpunkthöhe kaum noch angemessen niedrige Blendung erzielt wird. Zudem lassen die Ergebnisse aus

Kapitel 5 darauf schließen, dass bei einseitiger Beleuchtung die Erkennbarkeiten bei größerem Querversatz zur Lichtpunktreihe niedriger ausfallen als bei geringerem Versatz.

Der Einfluss der Reflexionseigenschaften einer Deckschicht wird bei den leuchtdichte- und erkennbarkeitsorientierten Optimierungsmethoden weitestgehend kompensiert. Bei Optimierungen auf Beleuchtungsstärken lohnt sich die Anpassung der Deckschicht an die Beleuchtungsinstallation, um die Sichtverhältnisse zu verbessern.

Eine Verringerung des Lichtstrombedarfs je Leuchte ist individuell abhängig von der Kombination aus Optimierungsmethode und Wahl der Straßendeckschicht. Der pauschale Vorteil einer einzelnen Optimierungsvariante bei bestmöglicher Erfüllung des jeweiligen Optimierungsziels wurde nicht festgestellt.

Planungs- und Bewertungsansätze

Die Vergleiche der optimierten LVK (vgl. Kapitel 5) zeigen, wie abhängig Aussagen zur Erkennbarkeit von der Wahl des als Referenz herangezogenen Sehobjektes sind. Dies bestätigen auch die zur Diskussion herangezogenen Arbeiten aus Unterkapitel 8.1.

Nach den vorliegenden Ergebnissen und der Häufigkeitsverteilung zum Auftreten typischer Reflexionsgrade von Fußgängerbekleidung empfiehlt sich das 20 %-Sehobjekt als ein guter Kompromiss aus allgemeingültiger Aussagekraft und realistischer Kritik. Sehobjekte höheren Reflexionsgrades sind höchstens für zusammenfassende Bewertungsverfahren wie das *STVL* oder \overline{VL} geeignet, bei denen Kontrastumkehrungen nicht gesondert betrachtet werden. Für ausführliche Betrachtungen, gerade bei Silhouettemethoden der LVK, ist ihre Aussagekraft ebenso gering wie die besonders niedriger Reflexionsgrade.

Die Bewertung der Erkennbarkeit mittels stationärer Beobachtungsform ist aus Sicht der Anwendung praktikabler. Hier ist es nicht notwendig Messgeräte immer wieder an neuen Positionen aufzubauen, um den konstanten Abstand zwischen Sehobjekt und Beobachter zu halten. Da sie hinsichtlich ihrer Aussagekraft zur Erkennbarkeit als die kritischere Beobachtungsform anzusehen ist, kann sie als Ersatz für die dynamische Beobachtung herangezogen werden (vgl. Kapitel 5 sowie Unterkapitel 8.1). Umgekehrt gilt dies nicht. Der Laborversuch aus Kapitel 6 zeigt dabei die Grenzen dieser Bewertungsform bei der Bestimmung des *VL* auf, denn bei großen Distanzen können für die Bewertung relevante Leuchtdichtebereiche über den Horizont gelangen oder die Beobachtungswinkel liegen außerhalb der für die *r*-Tabellen definierten Bereiche.

Es wurde festgestellt, dass die Kombination aus Beleuchtungsniveau und Gleichmäßigkeit oft, aber nicht zwingend, zu guten Erkennbarkeiten führt. Zwar wird mit hoher Gleichmäßigkeit und einem angemessenen Niveau der Beleuchtung ein Grundstein für gute Beleuchtung gelegt, ein Garant ist es jedoch nicht. Je nach Wahl des Optimierungskriteriums können Kontrastumkehr und Kontrastverflachung oftmals nicht vermieden werden. Hier gilt es, sich mit den Charakteristiken der einzelnen Optimierungsarten eingehend auseinanderzusetzen und entsprechend die Geometrie der Anlage anzupassen. Wie bereits angrenzende Untersuchungen aufgezeigt haben und diese Arbeit bestätigt (vgl. Unterkapitel 8.1), gilt: Eine ungleichmäßige Ausleuchtung der Fahrbahn weist meist schlechte Sichtverhältnisse durch Bereiche niedrigen Beleuchtungsniveaus und verflachter Objektkontraste auf; eine hohe Gleichmäßigkeit führt jedoch im Umkehrschluss nicht zwingend zu hervorragenden Erkennbarkeiten.

Das Visibility Level vermittelt vor allem bei differenzierter Betrachtung der Verläufe der Einzelwerte durch den Straßenverlauf hindurch das umfassendste Bild von der Erkennbarkeit innerhalb eines definierten Bewertungsfeldes. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Blendung, des Niveaus der Beleuchtung und deren Gleichmäßigkeit ergibt sich ein wirkungsvolles Instrument zur Planung und Bewertung der Qualität von Straßenbeleuchtung.

Die Ergebnisse zeigen weiter, dass zusammenfassende Qualitätskennzahlen wie Mittelwert, Median oder gewichteter Mittelwert im Falle des *STVL* nur grobe Aussagen zur Qualität der Beleuchtung und der bereitgestellten Sicherheit vermitteln können. Sie vernachlässigen möglicherweise vorhandene Zonen, an denen Objekte aufgrund der zu geringen *VL*-Einzelwerte nicht erkannt werden können und täuschen teils eine gute Erkennbarkeit vor, die nicht für den gesamten bewerteten Verkehrsraum gilt. Hier empfiehlt sich zur Verbesserung die Einbeziehung aller *VL*-Minimalwerte im Messfeld.

9.2 AUSBLICK

Die innerhalb dieser Arbeit untersuchten Ansätze zur Optimierung von Lichtverteilungen bieten neue Möglichkeiten der Auslegung und Bewertung ortsfester Straßenbeleuchtung und setzen sie in Beziehung zu etablierten Herangehensweisen. Nun muss das gewonnene Wissen in die praktische Anwendung überführt werden, um so zu einer stetigen Verbesserung der Sicherheit im öffentlichen Verkehrsraum beizutragen. Die untersuchten Optimierungsmethoden bilden hierfür, ebenso wie die erkennbarkeitsorientierte Bewertung und die damit verglichenen Qualitätskennzahlensysteme, ein weites Spektrum der Möglichkeiten für die aktuelle Forschung.

Leuchten, welche die präsentierten Lichtverteilungstypen praktikabel realisieren können, müssen entwickelt und dank zukünftiger, hierfür offener Standards in den praktischen Einsatz überführt werden. Das betrifft insbesondere die Standardisierung zur Bereitstellung und Berechnung erkennbarkeitsoptimierter Beleuchtung. Diese wird in Europa derzeit noch nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse der Unterkapitel 5.4 und 5.4.2 weisen darauf hin, dass die *VL*- und *STVL*-Bewertung weniger sensibel auf sicherheitskritische Beleuchtungssituationen mit erhöhter Blendung reagieren als die Quantifizierung des Störeinflusses der Blendung anhand des *TI*-Faktors. Daher müssen die Erkennbarkeitsuntersuchungen hierzu um weitere Forschungen zur physiologischen Blendung ausgedehnt werden.

Darüber hinaus wird empfohlen, die Diskrepanz zwischen wahrnehmungsphysiologischen Anforderungen an die Mindesterkennbarkeit und den mit optimierten LVK erzielbaren Erkennbarkeiten anhand individueller Probandenversuche aufzuklären.

Hinsichtlich des möglichen Energieeinsparpotentials muss der Vergleich der vier untersuchten Optimierungsmethoden um Erfüllungsgrade von $< 100\%$ des jeweiligen Optimierungsziels erweitert werden, da nur so zusätzliche, umfassende Aussagen zum Grad der Lichtstrom-einsparung in Abhängigkeit der Erfüllung der Erkennbarkeit getroffen werden können. Hierfür sind entsprechende Mindestwerte für den Grad der Optimierungserfüllung vorzugeben. Nur so können Kompromisslösungen aus hoher, aber nicht vollkommener Erfüllung der untersuchten Primärziele betrachtet werden. Auf diese Weise wird mehr Spielraum für die Lichtstrom-minimierung bereitgestellt.

Weitere Forschungen sollten aufgrund der durchgehend guten VL -Verläufe mit $-14 < VL_i < -7$ und niedriger Blendung innerhalb der hinteren Bewertungsfeldhälfte bei der $U_{o,Ehor}$ -Optimierung hinsichtlich eines möglichen Gegenstrahlprinzips erfolgen. Es könnte z. B. bei der Beleuchtung richtungsgebundener Tunnel mit visueller Fahrtrichtungstrennung verwendet werden.

Eine Optimierungsmethode nach dem Revealing-Power-Ansatz, die im Rahmen dieser Arbeit nicht entwickelt wurde, ist noch zu erforschen. Denn auch hier wird die örtliche Auflösung der Erkennbarkeit umfassend berücksichtigt.

Da die Arbeit ausschließlich Bewertungsfelder im Sinne der Fahrbahn untersucht, bleiben Erkenntnisse zu den Wirkzusammenhängen der Erkennbarkeit in angrenzenden Übergangsbereichen und angrenzenden vertikalen Architekturkomponenten (z. B. Fassaden nahe der Fahrbahn) weiter offen. Diese sind keinesfalls zu vernachlässigen und müssen daher weiter untersucht werden. Das gilt auch für den Einfluss der Repräsentation von Sehobjekten durch flache Graukarten auf die Erkennbarkeit. Ein Vergleich verschiedener flacher und volumenbehafteter Sehobjektcharakteristika würde die Reichweite der hier gewonnenen Erkenntnisse ebenso erhöhen wie die Fortführung und Implementierung der von Adrian begonnenen Untersuchungen zur Berücksichtigung der indirekten Anstrahlung des Sehobjektes (vgl. Abschnitt 2.2.4.3). Denn es gibt verdichtete Hinweise, dass jene zu erheblichen Unterschieden der Berechnung von Objekteleuchtdichten führt [ADRIAN 1995; ADRIAN & GIBBONS 1993; GIBBONS 1997; KECK & VICKSBURG 1993; W ADRIAN 1993]. Ein Zusammenführen mit den hier präsentierten Erkenntnissen zu einem erweiterten Untersuchungsdesign könnte umfangreiches, neues Wissen zur Erkennbarkeit von Objekten bereitstellen.

Grundlage der Optimierungsmethoden bilden die innerhalb des Optimierungswerkzeuges verwendeten Algorithmen und -definitionen. Deren stetige Weiterentwicklung ist notwendig, um eventuell ungenutztes Potential bei Genauigkeit und Funktionsumfang innerhalb der Optimierungsansätze, insbesondere bei der VL -Optimierung, weiter auszuschöpfen. Besonders interessant und vielversprechend ist die Untersuchung weiterer Varianten linearer, aber auch nicht-linearer und polygoner Optimierungsalgorithmen [u. a. VASSILEV & VELINOV 2004; VASSILEV ET AL. 2005; VASILEV & VELINOV 2007; STEFANOV & VASILEV 2009].

LITERATURANGABEN

- [ADRIAN 1969] ADRIAN, W.: *Die Unterschiedlichkeitsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung*. In: *Lichttechnik* 21 (1969), Nr. 1, S. 2A -7A.
- [ADRIAN 1989] ADRIAN, W.: *Visibility of Targets: Model for Calculation*. In: *Lighting Research and Technology* 21 (1989), Nr. 4, S. 181-188.
- [ADRIAN 1993A] ADRIAN, W.: *The Physiological Basis of the Visibility Concept*. In: Adrian, W. (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd International Symposium on Visibility and Luminance in Roadway Lighting: Orlando, Florida, USA: Lighting Research Institute, Inc., 1993, S. 17-30.*
- [ADRIAN 1993B] ADRIAN, W.: *Visibility Levels in Street Light Lighting: An Analysis of Different Experiments*. In: *Journal of The Illuminating Engineering Society* 22 (1993), Nr. 2, S. 49-52.
- [ADRIAN 1995] ADRIAN, W.: *Über die Berechnung der Sichtbarkeit*. In: *Licht* 10 (1995), S. 820-826.
- [ADRIAN & ENZMANN 1971] ADRIAN, W.; ENZMANN, J.: *Die Berechnung der Leuchtdichte und Blendung in der Straßenbeleuchtung mit Hilfe von elektronische Rechenmaschinen*. 2. Aufl. Karlsruhe: Berenz, 1971.
- [ADRIAN & GIBBONS 1993] ADRIAN, W., GIBBONS, R.: *Visibility Level und die Sichtbarkeit in der Straßenbeleuchtung*. In: *Licht* 10 (1993), S. 734-739.
- [ADRIAN ET AL. 1993] ADRIAN, W.; GIBBONS, R.; THOMAS, L.: *Amandments in Calculation STV: Influence of Light reflected from the Road Surface on the Target Luminance*. In: Adrian, W. (Hrsg.). *Proceedings of the 2nd International Symposium in Visibility and Luminance in Roadway Lighting: Orlando, Florida, USA: Lighting Research Institute, Inc., 1993, S. 93-100.*
- [ADRIAN & WALTHERT 1975] ADRIAN, W.; WALTHERT, R.: *Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesverkehrsministeriums und der Forschungsgesellschaft für Straßenwesen e.V. - Ermittlung optimaler Leuchtdichteverteilung*. In: *Straßenbau und Verkehrstechnik*. 183 (1975), S. 1-24.
- [AKASHI ET AL. 2007] AKASHI, Y.; REA, M. S.; BULLOUGH, J. D.: *Driver Decision Making in Response to Peripheral Moving Targets under Mesopic Light Levels*. In: *Lighting Research and Technology* 39 (2007), Nr. 1, S. 53-67.
- [AULHORN 1964] AULHORN, E.: *Über die Beziehung zwischen Lichtsinn und Sehschärfe*. In: *Graefes Archiv für klinische und Experimentelle Ophthalmologie* 167 (1964), Nr. 1, S. 4-74.

- [BACELAR ET AL. 1999A] BACELAR, A.; CARIOU, J.; HAMARD, M.: *Calculational visibility model for road lighting installations*. In: Lighting Research and Technology 31 (1999), Nr. 4, S. 177-180.
- [BACELAR ET AL. 1999B] BACELAR, A., CARIOU, J.; HAMARD, M.: *Current Street Lighting Characteristics and Visibility Level*. Proceedings of the 24th CIE Session - Warsaw 1999. Warschau: CIE, 1999. S. 214-216.
- [BAER 2006] BAER, R.: *Beleuchtungstechnik - Grundlagen*. 3., vollst. überarb. Aufl. Berlin: Verlag der Technik, 2006.
- [BEREK 1943] BEREK, M.: *Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung von Lichtreizen*. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 63 (1943), Nr. 9, S. 297-309.
- [BERGEN 2012] BERGEN, A.: *A Practical Method of Comparing Luminous Intensity Distributions*. In: Lighting Research and Technology 44 (2012), Nr. 1, 27-36.
- [BHISE ET AL. 1977] BHISE, V. D. ET AL.: *Modeling Vision with Headlights in a Systems Context*. In: Proceedings of the Society of Automotive Engineers, Warrendale 770238 (1977).
- [BLACKWELL 1946] BLACKWELL, R. H.: *Contrast Thresholds of the Human Eye*. In: Journal of the Optical Society of America 36 (1946), Nr. 11, S. 624-643.
- [BLACKWELL 1952] BLACKWELL, R. H.: *Brightness Discrimination Data for The Specification of Quantity of Illumination*. Proceedings of the National Technical Conference of the Illuminating Engineering Society. Chicago: Illuminating Engineering Society, 1952, S. 602-609.
- [BLACKWELL & BLACKWELL 1971] BLACKWELL, M. O.; BLACKWELL, R. H.: *Visual Performance Data for 156 Normal Observers of Various Ages*. In: Journal of the Illuminating Engineering Society of North America October (1971), S. 3-13.
- [BLACKWELL & BLACKWELL 1980] BLACKWELL, M. O.; BLACKWELL, R. H.: *Individual Responses to Lighting Parameters for a Population of 235 Observers of Varying Ages*. In: Journal of IES - Illuminating Engineering Society of North America 9 (1980), S. 205-232.
- [BODMANN & SCHMIDT 1989] BODMANN, H. W.; SCHMIDT, H. J.: *Road Surface Reflection on Road Lighting: Field Investigations*. In: Lighting Research and Technology 21 (1989), S. 159-170.
- [DE BOER & WESTERMANN 1964A] DE BOER, J. B.; WESTERMANN, H. O.: *Characterisation and Classification of Road Surfaces From the Point of View of Luminance in Public Lighting*. In: Lux 30 (1964), S. 385.
- [DE BOER & WESTERMANN 1964B] DE BOER, J. B.; WESTERMANN, H. O.: *The Discrimination of Road Surfaces Depending on the Reflection Properties and its Meaning for Road Lighting*. In: Lichttechnik 16 (1964), S. 487.

- [DE BOER 2009] DE BOER, J.; Panhans, B.; Reith, A.; Otto, A.; Wellner, F.: *Überprüfung verschiedener lichttechnischer Kennziffern bezüglich ihrer Eignung zur Erfassung der Helligkeit von Straßendeckschichten und die Entwicklung einer transportablen Einrichtung für die Messung der Helligkeit vor Ort und im Labor*. IBP-Bericht, WB 145/2009. Stuttgart: Fraunhofer IBP, 2009.
- [VAN BOMMEL & DE BOER 1980] VAN BOMMEL, W. J. M. & DE BOER, J. B.: *Road Lighting* (1980). zitiert in [GIBBONS 1997, S.33].
- [BOYCE 2009] BOYCE, P. R.: *Lighting for Driving - Roads, Vehicles, Signs, and Signals*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
- [BREMER 2012] BREMER, S. 2012: *Prüfung der Anwendbarkeit des Visibility Concept zur praxisnahen Bewertung und Planung von Straßenbeleuchtungsanlagen mit niedrigem Beleuchtungsniveau*. Berlin: Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, 2012, Bachelorarbeit.
- [BRUSQUE ET AL. 1999] BRUSQUE, C.; PAULMIER, G.; CARTA, V.: *Study of The Influence of Background Complexity on the Detection of Pedestrians in Urban Sites*. In: Proceedings of the CIE 24th Session, Warsaw 1999, Volume 1, Part 2. Warschau, Polen: Commission Internationale De L'Eclairage, 1999. S. 217 - 219.
- [BSI 2012] BSI: *BS 5489-1:2013. Code of practice for the design of road lighting* *Lighting of roads and public amenity areas*. London: British Standart Institute, 2013.
- [BUSCHMANN 2012] BUSCHMANN, S: *Optimierung des Netzmanagements für verkehrsflussadaptive Straßenbeleuchtung in Berlin*. Berlin: Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, 2012, Studienarbeit.
- [CHRISTENFELDT 2012] CHRISTENFELDT, M.: *Analyse & Bewertung von Sensoriksystemen für adaptive Straßenbeleuchtungssysteme*. Berlin: Technische Universität Berlin, Fachgebiet Lichttechnik, 2012, Studienarbeit.
- [CIE 1978] CIE: *CIE Publication 41:1978 - Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement*. Vienna, Austria: 1978.
- [CIE 1981A] CIE: *CIE Publication 19/2.1-1981: An Analytic Model for Describing the Influence of Lighting Parameters upon Visual Performance - Technical Foundations*. Paris, France: 1981.
- [CIE 1981B] CIE: *CIE Publication 19/2.2-1981: An Analytic Model for Describing the Influence of Lighting Parameters upon Visual Performance - Summary an Application Guidelines*. Paris, France: 1981.
- [CIE 1984] CIE: *CIE Publication 066:1984 - Road Surfaces and Lighting*. Vienna, Austria: 1984.
- [CIE 1992] CIE: *CIE Publication 95: 1992 - Contrast an Visibility*. Vienna, Austria: 1992.
- [CIE 1996] CIE: *CIE Publication 121 - 1996: The photometry and goniophotometry of luminaires*. Vienna, 1996.

- [CIE 2002] CIE: *CIE TC 1-50 report 146:2010 - CIE equations for disability glare*. Vienna, 2002.
- [CIE 2010A] CIE: *CIE Publication 115:2010 - Lighting of roads for motor and pedestrian traffic. 2nd edition*. Vienna, Austria: 2010.
- [CIE 2010B] CIE: *CIE Publication 191:2010 - Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. Vienna, Austria: 2010.
- [CIE 2011] CIE: *CIE Standard S 017:2011 - International Lighting Vocabulary, Internationales Wörterbuch der Lichttechnik*. Vienna, Austria: 2011.
- [DIJON & JUSTIN 1998] Dijon, J. M.; Justin, M.: *Quality Criteria for Road Lighting and Uniformity Levels? Or Visibility?* Second National Illumination Congress. Istanbul, Turkey, 1998, S. 138-141.
- [DIJON & MALDAQUE 1997] Dijon, J. M.; Maldaque, L.: *Quality Criteria For Road Lighting and Uniformity Levels? Or Visibility?* Lux Europa. Amsterdam, Netherlands, 1997, S. 37-57.
- [DILAURA ET AL. 2011] DiLaura, D. L. et al.: *The IESNA lighting handbook: reference & application*. 10th edition. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2011.
- [DIN 1985] DIN: *DIN 5032, Teil 7: Lichtmessung - Klasseneinteilung von Beleuchtungsstärkemessgeräten und Leuchtdichtemessgeräten*. Berlin: 1985.
- [DIN 1992] DIN: *DIN 5032, Teil 2: Lichtmessung - Betrieb elektrischer Lampen und Messung der zugehörigen Größen*. Berlin: 1992.
- [DIN 1999A] DIN: *DIN 5032-1: Lichtmessung - Teil 1: Photometrische Verfahren*. Berlin: 1999.
- [DIN 1999B] DIN: *DIN 5032-4: Lichtmessung - Teil 4: Messungen an Leuchten*. Berlin: 1999.
- [DIN 2004] DIN: *DIN EN 13032-1: Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 1: Messung und Datenformat; Deutsche Fassung EN 13032-1:2004*. Berlin: 2004.
- [DIN 2005] DIN: *DIN EN 13032-2:2004: Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 2: Darstellung der Daten für Arbeitsstätten in Innenräumen und im Freien; Deutsche Fassung EN 13032-2:2004*. Berlin: 2005.
- [DIN 2006] DIN: *DIN EN 13032-1 Berichtigung 1: Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 1: Messung und Datenformat; Deutsche Fassung EN 13032-1:2004, Berichtigungen zu DIN EN 13032-1:2004-10; Deutsche Fassung EN*. Berlin: 2006.
- [DIN 2007A] DIN: *DIN 13201-1: Straßenbeleuchtung - Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen*. Berlin: 2007.
- [DIN 2007B] DIN: *DIN EN 12464-2:2007: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 2: Arbeitsplätze im Freien; Deutsche Fassung EN 12464-2:2007*. Berlin: 2007.

- [DIN 2007C] DIN: *DIN EN 13032-2 Berichtigung 1: Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten - Teil 2: Darstellung der Daten für Arbeitsstätten in Innenräumen und im Freien; Deutsche Fassung EN 13032-2: 2004, Berichtigungen*. Berlin: 2007.
- [DIN 2007D] DIN: *DIN EN 13201 - Teil 2 bis 4 und DIN 13201 - Teil 1: Straßenbeleuchtung*. Berlin: 2007.
- [DIN 2007E] DIN: *DIN EN 13201-2: Straßenbeleuchtung - Teil 2: Güteermale; Deutsche Fassung EN 13201-2:2003*. Berlin: 2007.
- [DIN 2007F] DIN: *DIN EN 13201-3: Straßenbeleuchtung - Teil 3: Berechnung der Güteermale; Deutsche Fassung EN 13201-3:2003*. Berlin 2007.
- [DUNBAR 1939] Dunbar, C.: *Visual Efficiency in Coloured Light*. In: Transactions of The Illuminating Engineering Society (London) 4 (1939), S. 137-151.
- [EBERBACH 1973] Eberbach, K.: *Lichtstärkeverteilungen bei optimaler Leuchtdichtegleichmäßigkeit in der Straßenbeleuchtung*. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe (TH), 1973.
- [ECKERT 1993] Eckert, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. 1. Aufl.. München: Verlag Technik GmbH, 1993.
- [ENZMANN 1977] Enzmann, J.: *Über die Sichtbarkeit von Objekten bei der Beleuchtung von Straßen*. Dissertation. Karlsruhe: Universität Fridericiana Karlsruhe, 1977.
- [ERBAY 1973] Erbay, A.: *Verfahren zur Kennzeichnung der Reflexionseigenschaften von Fahrbahndecken*. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 1973.
- [FISCHBACH 1998] Fischbach, I.: *Spezifikation von Systemeigenschaften für CCD-Kameras und deren Bestimmung sowie Anwendung der bildauflösenden Leuchtdichtemessung in der Außenbeleuchtung*. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 1998.
- [FISCHBACH & KRÜGER 1998] Fischbach, I.; Krüger, U.: *Erfassung photometrisch richtiger Daten mit CCD-Kameras*. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Tagungsband 43, Band 1. Technische Universität Ilmenau: 1998, S. 658-664.
- [FISCHBACH & SCHMIDT 1999] Fischbach, I.; Schmidt, F.: *Die Erfassung lichttechnischer Größen mit bildauflösender Leuchtdichtemessung (Leuchtdichteanalysator)*. 44th International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau, 1999.
- [FRANKE 2012] Franke, R.: *Gütebewertung und Optimierung von Straßenbeleuchtungssimulationen mit RADIANCE*. Bachelorarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2012.
- [FRAUENHOFER 2015] Frauenhofer, M.: *Messtechnische Validierung der praktischen Umsetzung simulierter Lichtstärkeverteilungskörper*. Voraussichtliche Diplomarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2015.

- [FREDERIKSEN & SØRENSEN 1976] Frederiksen, E.; Sørensen, K.: *Reflection Classification of Dry and Wet Road Surfaces*. In: *Lighting Research and Technology* 8 (1976), Nr. 4, S. 175-186 .
- [FULLER & MCNEIL 2013] Fuller, D. E.; McNeil, D.: *Radiance - A Validated Lighting Simulation Tool*. 2013. <http://www.radiance-online.org/> [Stand 2014-05-18].
- [GEORGIEV & VASILEV 2008] Georgiev, V. & Vasilev, H.: *Optimization of LEDs Lighting Distribution in Road Lighting Luminaire*. Twelfth International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems. Proceedings, Vol. 1. Sofia: IEE Bulgaria Section, 2008, S. 211-216.
- [GESCHKE 2001] Geschke, D.: *Physikalisches Praktikum. Mit multimedialen Ergänzungen*. 12., überarb. Aufl. H. Ernst et al. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2001.
- [GIBBONS 1997] Gibbons, R. B.: *Influence of Pavement Reflection on Target Visibility*. Doctoral Thesis. Ontario, Kanada: University of Waterloo. 1997.
- [GOLDMANN 1956A] Goldmann, H.: *Die Beeinträchtigung der Sichtbarkeit im Straßenverkehr durch Blendungseffekte*. In: *Bulletin of the American Society of Engineering* 56 (1956), Nr. 20, S. 891-896.
- [GOLDMANN 1956B] Goldmann, H.. Zitiert in Hentschel, H. J.: *A Physiological Appraisal of the Revealing Power of Street Lighting Installations For Large Composite Objects*. *Lighting Research and Technology* 3 (1971), Nr. 4, S. 268. In: *Bull. ASE* 56 (1956), S. 891.
- [GRÄNICHER 1996] Gränicher, H. W. 1996. *Messung beendet - was nun?: Einführung und Nachschlagewerk für die Planung und Auswertung von Messungen*. 2., überarb. Aufl. Zürich: Vieweg+Teubner Verlag: 1996.
- [GROSSKURTH 1997] Grosskurth, K.: *Tragweite von Lichtsignalen*. In: *Lichttechnik* 9 (1957), S. 551-553.
- [GÜLER & ONAYGIL 2003] Güler, Ö.; Onaygil, S.; Güler, O.: Authors' response to D Simpson and J Lecocq. In: *Lighting Research and Technology* 35 (2003), Nr. 3, S. 214-215.
- [GÜLER ET AL. 2003] Güler, Ö., Onaygil, S.; Simpson, D.: *The Effect of Luminance Uniformity on Visibility Level in Road Lighting*. In: *Lighting Research and Technology* 35 (2003), Nr. 3, S. 199-215.
- [HENTSCHEL 1967] Hentschel, H. J.: *Über eine allgemeine Bewertung des Kontrastes in der Straßenbeleuchtung*. In: *Lichttechnik* 19 (1967), Nr. 5, S. 56 A-58 A.
- [HENTSCHEL 1969] Hentschel, H. J.: *Zur Frage der Unterschiedsschwelle und einer allgemeinen Bewertung des Kontrastes großer zusammengesetzter Objekte im Straßenverkehr*. In: *Lichttechnik* 21 (1969), Nr. 3, S. 26 A-28 A.

- [HENTSCHEL 1971] Hentschel, H. J.: *A Physiological Appraisal of the Revealing Power of Street Lighting Installations for Large Composite Objects*. In: *Lighting Research and Technology* 3 (1971), Nr. 4, S. 268-273.
- [HENTSCHEL 2002] Hentschel, H. J.: *Licht und Beleuchtung - Grundlagen und Anwendung der Lichttechnik*. 5. Aufl. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2002.
- [HOCHSTÄDT 1970] Hochstädt, E.: *Lichtstärkeverteilungen zur Erzielung einer möglichst guten Leuchtdichte-Längsgleichmäßigkeit bei unterschiedlichen Straßenbelägen*. In: *Lichttechnik* 22 (1970). Nr. 1, S. 13-14.
- [HOLLADAY 1926] Holladay, L.: *The Fundamentals Of Glare And Visibility*. In: *J. Opt. Soc. Am.* 12 (1926), Nr. 4, S. 271-319.
- [IESNA 2001] IESNA: *IESNA Publication LM-75-01: Goniophotometer Types and Photometric Coordinates*. New York: 2001.
- [IESNA 2005] IESNA: *ANSI / IESNA RP-8-00: American National Standard Practice for Roadway Lighting*. New York: 2005.
- [JANOFF 1993] Janoff, M. S.: *Investigations of Visual Performance Related to the Visibility Level*. W. K. Adrian (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd International symposium on Visibility and Luminance in Roadway Lighting*. Orlando, Florida, USA: Lighting Research Institute, Inc., 1993, S. 55-64.
- [JIANG & PETKOV 2009] Jiang, X.; Petkov, N.: *Computer Analysis of Images and Patterns*. 13th International Conference of CAIP 2009. Münster, Deutschland: Springer, 2009.
- [JOKISCH 2013] Jockisch, L.: *Entwicklung und Einrichtung eines Versuchsstandes zur Bewertung von Sicherheit und Energieeffizienz örtlich adaptiver LED-Leuchten*. Diplomarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2013.
- [JOHNSON ET AL. 1978] Johnson, C. A.; Keltner, J. L.; Balastrery, F.: *Effect of Target Size and Eccentricity on Visual Detection and Resolution*. In: *Vision Research* 18 (1978), S. 1217-1222.
- [KEBSCHULL 1968] Kebschull, W.: *Die Reflexion trockener und feuchter Straßenbeläge*. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin, 1968.
- [KECK 1993] Keck, M.: Personal Communication. 1993, zitiert in Phillips 1993, S.32.
- [KECK & STARK 1987] Keck, M. E.; Stark, R. E.: *Evaluation of Visibility Models in the Roadway Situation*. *Proceedings of the CIE 21st Session, Venice, 17-25 June 1987, Volume I*. Venedig: CIE (Commission Internationale De L'Eclairage), 1987, S. 282-285.
- [KECK & VICKSBURG 1993] Keck, M. E.; Vicksburg, M. S.: *Optimization of Lighting Parameters for Maximum Object Visibility and its Economic Implications*. W. K. Adrian (Hrs.): *Proceedings of the 2nd International Symposium in Visibility and Luminance in Roadway Lighting*. Orlando, Florida, USA: Lighting Research Institute, Inc., 1993, S. 43 - 51.

- [KÖHLER 2011] Köhler, S.: *Messtechnische Bestimmung von Leuchtdichtekoeffizienten für Fahrbahndeckschichten unter flachen Anstrahlwinkeln*. Dissertation. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik. Technische Universität Berlin, 2011.
- [KÖHLER & NEUMANN 2012] Köhler, S.; Neumann, C.: *Luminance Coefficients of Road Surfaces for Low Angles of Illumination*. In: *Lighting Research and Technology* 45 (2012), Nr. 5, S. 599-613.
- [KOKOSCHKA 1988] Kokoschka, S.: *Zur Berechnung von Schwellenkontrasten für die Detektion einfacher Sehobjekte*. *Licht* 4 (1988), S. 305-309.
- [KOKOSCHKA & GALL 2000] Kokoschka, S.; Gall, D.: *Projekt FASIVAL - Entwicklung und Validierung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrer-sichtweite*. In: *Programm MOTIV*. Abschlussbericht. 2000.
- [KOSMATKA 2003] Kosmatka, W. J.: *Differences in Detection of Moving Pedestrians Attributable to Beam Patterns and Speeds*. PAL Progress in automobile lighting. München: Herbert Utz Verlag, 2003, S. 549-566.
- [KRENTZ 2009] Krenz, Peter: *Bestimmung von Kriterien zur Bewertung innovativer Straßenbeleuchtung anhand des Gütekriteriums Leuchtdichte*. Studienarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2009.
- [KRENTZ 2010] Krenz, Peter: *Entwicklung der Empfehlung für innovative Straßenbeleuchtung anhand des Gütemerkmals Objektkontrast*. Diplomarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2010.
- [LE 2012] Le, H. T. H.: *Simulation und Bewertung von Sehobjekt-kontrastverläufen in der Lichtplanungsumgebung DIALux*. Bachelorarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2012.
- [LECOCQ 1991] Lecocq, J.: *Visibility Level in Outdoor Lighting. Adrian Model Applied to Spherical Cap Targets*. Proceedings of the 22nd CIE session, Volume 1, Part 2, Division 4. Melbourne, 1991, S. 48-51.
- [LECOCQ 1993] Lecocq, J.: *The Application of the Visibility Level to Hemispherical Multifaceted Targets*. W. Adrian (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Symposium in Visibility and Luminance in Roadway Lighting. Orlando, Florida, USA: Lighting Research Institute, Inc., 1993, S. 101-112.
- [LECOCQ 1997] Lecocq, J.: *Visibility in Road Lighting Correlation of Subjective Assessments with Calculated Values*. Lux Europa. Amsterdam, Netherlands 1997, S. 22-36.
- [LECOCQ 1999] Lecocq, J.: *Calculation of the Visibility Level of Spherical Targets in Roads*. In: *Lighting Research and Technology* 31 (1999), Nr. 4, S. 171-175.
- [LESZCZYNSKA & KURZAWA 1990] Leszczynska, H.; Kurzawa, M.: *Multikriterielle Optimierungsmethode und ihre lichttechnische Anwendung*. Proceedings of Licht 90 in Rotterdam. Arnhem: Nederlandse Stichting voor Verlichtingskunde, 1990, S. 407-415.

- [LEWIN 1993] Lewin, I.: *Measurements of STV-VL and the Reasons for Possible Deviations*. W. K. Adrian (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Symposium in Visibility and Luminance in Roadway Lighting. Orlando, Florida, USA: EPRI Lighting Research Institute, Inc., Palo Alto, CA, USA, 1993, S. 81-92.
- [LOSSAGK 1955] Lossagk, H.: *Die Blendstörwirkung im Straßenverkehr*. In: Deutsche Kraftfahrtforschung 90 (1955), S. 11.
- [LU 2013] Lu, Y.-W.: *Validierung der Optimierungssoftware LiDot durch Auswertung generierter Referenz-Lichtstärkeverteilungskörper*. Studienarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2013.
- [LU 2014] Lu, Y.-W.: *Analyse von Simulationen zur Optimierung von Lichtverteilungen in der ortsfesten Straßenbeleuchtung*. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2014.
- [LUCKIESH & HOLLADAY 1925] Luckiesh, M.; Holladay, L. L.: *Glare and Visibility - A Resumé of the Results Obtained in Investigations of Visual and Lighting Conditions Involving These Factors*. In: Transactions of the Illuminating Engineering Society (New York) 1925, S. 221-247.
- [MACE 1997] Mace, D.: *Safety Benefits of Roadway Lighting Using Small Target Visibility (STV) Design*. Washington, D. C.: The Last Recourse Inc, 1997.
- [MATHWORKS 2014] The MathWorks Inc.: *Matlab - Die Sprache für technische Berechnungen*. Tutorial. Online: <http://de.mathworks.com/products> [Stand 17.01.2014], 2014.
- [MATHWORKS 2015] The MathWorks Inc.: *Documentation: linprog*. Online: <http://de.mathworks.com/help/optim/ug/linprog.html> [Stand 25.01.2015], 2015.
- [MÉNARD & CARIOU 1992] Ménard, J.; Cariou, J.: *Charactéridation d'une installation d'éclairage public à partir du contraste d'une cible normalisée*. Revue LUX 168 (1992), S. 20-22.
- [MÉNARD & CARIOU 1994] Ménard, J.; Cariou, J.: *Road lighting: Assessment of an Installation Based on the Contrast of a Standard Target*. In: Lighting Research and Technology 26 (1994), Nr. 1, S. 19-22.
- [NARISADA 1971] Narisada, K.: *Influence of Non-Uniformity in Road Surface Luminance of Public Lighting Installation Upon Perception of Objects on the Road Surface by Car Drivers*. Proceedings of the 18th CIE Session. Barcelona, 1971, S. 71.17.
- [NARISADA 1995] Narisada, K.: *Perception in Complex Fields Under Road Lighting Conditions*. In: Lighting Research and Technology 27 (1995), Nr. 3, S. 123-131.
- [NARISADA 2003] Narisada, K.: *Visual Problems Associated with Driving Experiments*. PAL - Proceedings of Progress in Automobile Lighting. Darmstadt: Herbert Utz Verlag GmbH, 2003.
- [NARISADA ET AL. 2003] Narisada, K.; Karasawa, Y.; Shirao, K.: *Design Parameters Of Road Lighting and Revealing Power*. CIE 152:2003, 25TH SESSION OF THE CIE, San Diego, 25 June - 2 July 2003. Wien: CIE (Commission Internationale De L'Eclairage), 2003, S. D4-50 - D4-57.

- [NARISADA & YOSEOIKAWA 1974] Narisada, K.; Yoseoikawa, K.: *Tunnel Entrance Lighting – Effect Of Fixation Point and Other Factors on the Determination of Requirements*. In: *Lighting Research and Technology* 6 (1974), Nr. 1, S. 9-18.
- [OCHOA ET AL. 2012] Ochoa, C. E.; Aries, M. B. ; Hensen, J. L.: *State of the Art in Lighting Simulation for Building Science: A Literature Review*. In: *Journal of Building Performance Simulation* 5 (2012), Nr. 4, S. 209-233.
- [PACHAMANOV & PACHAMANOVA 2008] Pachamanov, A.; Pachamanova, D.: *Optimization of the Light Distribution of Luminaries for Tunnel and Street Lighting*. In: *Engineering Optimization* 40 (2008), Nr. 1, S. 47-65.
- [PAULMIER ET AL. 2001] Paulmier, G et al.: *The Influence of Visual Complexity on the Detection of Targets Investigated by Computer Generated Images*. In: *Lighting Research and Technology* 33 (2001), Nr. 3, S. 197-205.
- [PHILLIPS 1993] Phillips, E. S.: *Computer visualisation of roadwas lighting. STV - vs. Traditional Design Criteria*. W. K. Adrian (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd International Symposium in Visibility and Luminance in Roadway Lighting*. Orlando, Florida, USA: EPRI Lighting Research Institute, Inc., Palo Alto, CA, USA, 1993, S. 31-41.
- [PÖPPEL & HARVEY 1973] Pöppel, E.; Harvey, L. O.: *Light Difference Treshold and Subjective Brightness in the Perephery of the Visual Field*. In: *Psychologische Forschung* 36 (1973), S. 145-161.
- [PSYRIDIS 2010] Psyridis, E.: *Development of a Perception-Optimised Road Lighting Concept With the Help of the Quality Criterion Object Contrast Taking into Account Energy-Efficient Operating Methods and the Recommendations of EN13201*. Masterarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2010.
- [PUSCH 1973] Pusch, R.: *Die Erfassung der lichttechnischen Eigenschaften von Straßendecken - Ergebnisse einer Messreihe*. In: *Lichttechnik* 25 (1973), S. 100-105.
- [REEB 1954] Reeb, O.: *Zur Frage der Kontrastverhältnisse bei der Straßenbeleuchtung*. In: *Lichttechnik* 6 (1954), Nr. 8, S. 283-287.
- [REEB & SCHLEISS 1956] Reeb, O.; Schleiss, R.: *Weitere Untersuchungen über die Kontrastverhältnisse bei der Straßenbeleuchtung*. In: *Lichttechnik* 8 (1956), Nr. 9, S. 382-386.
- [ROCH & SMIA TEK 1969] Roch, J.; Smiatek, G.: *Überlegungen zur Gestaltung der Lichtstärkeverteilung einer leuchtdichtetechnisch optimalen Leuchte*. In: *Lichttechnik* 21 (1969), Nr. 7, S. 75A-81A.
- [ROCHOW 2009] Rochow, F.: *Re-Installation Report GO-DS 2000 088612 TUB lfl*, Berlin. 2009.
- [SCHADE 2008] Schade, S.: *Empirische Bewertung der aktiven Lichtfunktionen „blendfreies Fernlicht“ und „markierendes Licht“ anhand des Gütemerkmal Objekterkennung*. Diplomarbeit. Ilmenau: Institut für Lichttechnik, Technische Universität Ilmenau, 2008.

- [SCHADE ET AL. 2009] Schade, Sebastian et al.: *Lichttechnische Lösungen für eine innovative und energiesparende Beleuchtung im Rahmen des Gesamtkonzepts für die öffentliche Beleuchtung Berlins - Projektbericht*. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2009.
- [SCHADE ET AL. 2010] Schade, Sebastian et al.: *Lichttechnische Lösungen für eine innovative und energiesparende Beleuchtung im Rahmen des Gesamtkonzepts für die öffentliche Beleuchtung Berlins - Teil 2. Projektbericht*. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2010.
- [SCHADE & VÖLKER 2011] Schade, S.; Völker, S.: *Lichttechnische Lösungen für eine innovative und energiesparende Beleuchtung im Rahmen des Gesamtkonzepts für die öffentliche Beleuchtung Berlins Projektbericht*. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2011.
- [SCHADE & VÖLKER 2013] Schade, S.; Völker, S.: *Neue Planungs- und Entwicklungsverfahren zur Bestimmung adaptiver Lichtverteilungen in der LED-Straßenbeleuchtung*. Tagungsband Lux Junior 2013. Ilmenau: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V. (LiTG) Bezirksgruppe Thüringen-Nordhessen, 2013, S. 1-30.
- [Schäfer 2011] Schäfer, S.: *Rezeptororientierte Charakterisierung breitbandiger Spektren als Basis einer mesopischen Hellempfindung*. Dissertation. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2011.
- [SCHEFRIN ET AL. 1999] Scheffrin, B. E.; Tregear, S. J.; Harvey, L. O.; Werner, J. S.: *Senescent Changes in Scotopic Contrast Sensitivity*. In: *Vision Research* 39 (1999). S. 3728-3736.
- [SCHEIBLER 2013] Scheibler, B.: *Innovative Straßenbeleuchtung zur Verbesserung von Sichtbarkeit und Energieeffizienz: Konfiguration von Referenz-Lichtverteilungen und deren praktische Realisierung mit einer adaptiven LED-Leuchte*. Bachelorarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2013.
- [SCHMIDT 1987] Schmidt, H.-J.: *Probleme und Möglichkeiten der Leuchtdichtemesstechnik in der Straßenbeleuchtung*. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12* (1987), S. 83.
- [SCHREUDER 2008] Schreuder, D.: *Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception: On Visual Science and Outdoor Lighting Engineering*. Berlin: Springer Science, 2008, S. 327.
- [SCHULZE 2014] Schulze, C.: *Persönliche Kommunikation*, 2014.
- [SMITH 1938] Smith, F. C.: *Reflection Factors and Revealing Power*. In: *Transactions of the Illuminating Engineering Society (London)* 3 (1938), S. 196-200.
- [SØRENSEN 1975] Sørensen, K.: *Report No. 10:1975 - Road Surface Reflection Data*. Lyngby, Dänemark: The Danish Illuminating Engineering Laboratory, 1975.

- [STEBLAU 2013] Steblau, J.: *Optimierung von Lichtstärkeverteilungskörpern auf die Erkennbarkeit einfacher Sehobjekte*. Diplomarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2013.
- [STEFANOV & VASILEV 2009] Stefanov, S. B.; Vasilev, H. N.: *Optimizing Parameters of Street Lighting Systems Designed by Small Target Visibility Criteria*. Proceedings of 11th European Lighting Conference LUX Europa. Istanbul, Turkey: 2009, S. 1213-1220.
- [TECHNOTEAM 2009] Technoteam Bildverarbeitungs GmbH: *Kalibrierschein bildaufgelöstes Leuchtdichtemessgerät LMK 98-4: Werkskalibrierung (TechnoTeam) - Kalibrierung für optische Strahlungsgrößen 2009*, S. 1-18.
- [VASILEV ET AL. 2007] Vasilev, H. N.; Velinov, K. L.: *Influence of Geometrical Parameters and Rule Requirements on the Optimum Light Distribution of the Street Luminaires*. International Conference ILUMINAT, Sofia: 2007.
- [VASILEV ET AL. 2010A] Vasilev, H.; Georgiev, V.; Draganova, I. et al.: *Road Lighting System with Asymmetric Emission Pointed Against The Direction of Traffic Movement*. Proceedings of the Technical University - Sofia 60, book 2, 2010, S. 131-136.
- [VASILEV ET AL. 2010B] Vasilev, H.; Georgiev, V.; Draganova, I.: *Road lighting System with Asymmetric Emission Pointed Against The Direction of Traffic Movement*. Proceedings of the Technical University - Sofia 60, book 2, 2010, S. 137-143.
- [VASSILEV & VELINOV 2004] Vassilev, H.; Velinov, K.: *Optimization of the Light Distribution of Street Luminaires*. 5. Ulusal Aydınlatma Kongresive Interlight Istanbul Fuari. Istanbul, 2004.
- [VASILEV & VELINOV 2007] Vasilev, H.; Velinov, K.: *Optimization of Light Distribution of the Street Luminaires*. In: Advances in Bulgarian Science. National Scientific Programmes with European Dimensions (2007), S. 13-21.
- [VASSILEV ET AL. 2005] Vassilev, H.; Velinov, K.; Ganchev, G.: *High Efficiency Street Luminaires*. Illuminat Romania 2005, 2005.
- [VELINOV 1996] Velinov, K.: *EPS 1.4.2 Program for Designing Street Lighting Devices. Technical Description*. SD Elektroprograma, 1996.
- [VÖLKER 2006] Völker, S.: *Hell- und Kontrastempfindung - ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeugscheinwerfern*. Habilitationsschrift. Paderborn: Universität Paderborn, 2006.
- [WALDRAM 1938] Waldram, J. M.: *The Revealing Power of Street Lighting Installations*. In: Transactions of the Illuminating Engineering Society (London) 3 (1938), S. 173-186.
- [WALDRAM & HENTSCHEL 1972] Waldram, J. M.; Hentschel, H. J.: *A Physiological Appraisal of the Revealing Power of a Street Lighting Installation for Large Composite Objects*. In: Lighting Research and Technology 4 (1972), Nr. 2, S. 107-108.
- [WALTHERT 1973] Walthert, R.: *Zur Bewertung der Leuchtdichtevertellung beleuchteter Straßen*. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1973.

- [WASSILEV 1982] Wassilev, C.: *Optimierung der Straßenbeleuchtung auf der Grundlage der Kontrastwiedergabe*. Forschungshefte zur Verkehrssicherheit 11/12 (1982), S. 123-137.
- [YAYHAOUI 2012] Yayhaoui, A.: *Entwicklung eines Simulationsverfahrens zur Analyse des Zusammenwirkens aus Kfz-Beleuchtung und ortsfester Straßenbeleuchtung mittels der Raytracing-Software Radiance*. Masterarbeit. Berlin: Fachgebiet Lichttechnik, Technische Universität Berlin, 2012.
- [YLINEN ET AL. 2010] Ylinen, A.; Puolakka, M.; Halonen, L.: *Road Surface Reflection Properties and Applicability of the R-Tables for Today's Pavement Materials in Finland*. In: *Light & Engineering* 18 (2010), Nr. 1, S. 78-90.
- [ZHANG 1995] Zhang, Y.: *Solving Large-Scale Linear Programs by Interior-Point Methods Under the MATLAB Environment*. Technical Report TR96-01. Baltimore County, Baltimore, MD: Department of Mathematics and Statistics, University of Maryland, 1995.
- [ZWAHLEN 1985] Zwahlen, H.: *Driver eye scanning*. In *Taylor and Francis Proceedings of the 9th Congress of the International Ergonomics Association*. In: Ergonomics International, 1985. S. 508.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1:	Sehobjekte bei unpassend dimensionierter und idealer Beleuchtung	2
Abbildung 2.1:	(C, γ) -System, bezogen auf die Längsrichtung der Fahrbahn.....	4
Abbildung 2.2:	Darstellung des räumlichen Leuchtdichtekoeffizienten $q(\gamma, \beta)$ der Fahrbahn und Geometrie von Lichteinfall- und Blickrichtung des Beobachters.....	6
Abbildung 2.3:	Verlauf der Leuchtdichteunterschiedsschwelle als Funktion des Sehwinkels ..	14
Abbildung 2.4:	Leuchtdichtebereiche zur Bestimmung der mittleren Untergrundleuchtdichte nach ANSI IESNA RP-8-00.....	15
Abbildung 2.5:	Gegenüberstellung der einfachen Betrachtung der Objektumgebung und der differenzierten Betrachtung nach Kokoschka.....	16
Abbildung 2.6:	Goldmann-Häufigkeitsverteilung von Reflexionsgraden typischer Fußgängerbekleidung nach Enzmann	17
Abbildung 2.7:	Kumulative Wahrscheinlichkeit zum Erkennen von Objekten in Abhängigkeit des Sehobjektreflexionsgrades für Negativkontraste	17
Abbildung 2.8:	Direkte und indirekte Anstrahlung des Sehobjektes	20
Abbildung 2.9:	Zur Bewertung von Kontrast und Schleierleuchtdichte relevante Leuchtdichtebereiche	24
Abbildung 2.10:	Zusammenhang kritischer Reflexionsgrade und der kumulierten Wahrscheinlichkeit anhand deren VL	30
Abbildung 3.1:	Geometrie- und Winkelkonventionen für Leuchten und Beleuchtungsszene ..	39
Abbildung 3.2:	Bewertungsfeld	43
Abbildung 3.3:	Untergrundleuchtdichte und adaptionsbestimmende Umfeldleuchtdichte	45
Abbildung 4.1:	Linearisierung der Unterschiedsschwelle	56
Abbildung 4.2:	Geometrie zur Interpolation der blendungsrelevanten Lichtstärke	58
Abbildung 4.3:	Schematisches Flussdiagramm des LiDot Frameworks.....	60
Abbildung 4.4:	Simulationsprozesse und Verknüpfung von Radiance und Matlab®	61
Abbildung 4.5:	Verkehrswege in der Simulation.....	62
Abbildung 4.6:	Vergleich von simuliertem und realem Leuchtdichtebild.....	62
Abbildung 5.1:	LVK für gleichmäßige Verteilung der horizontalen Beleuchtungsstärke	64
Abbildung 5.2:	LVK für gleichmäßige Verteilung der vertikalen Beleuchtungsstärke.....	65
Abbildung 5.3:	LVK der Optimierung auf uniforme Leuchtdichteverteilung	65

Abbildung 5.4:	Realisierte Lichtstärkeverteilungskörper für die Optimierung auf eine uniforme Leuchtdichtevertellung.....	66
Abbildung 5.5:	Erzielte mittlere Leuchtdichten und Beleuchtungsstärkeniveaus.....	67
Abbildung 5.6:	Erzielte U_o der drei gleichmäßigkeitsorientierten Optimierungen	68
Abbildung 5.7:	Typischer VL -Verlauf bei gleichmäßiger E_{hor}	69
Abbildung 5.8:	Ausleuchtung der Fahrbahn bei $U_o(E_{hor})$ -Optimierung	70
Abbildung 5.9:	Typischer VL -Verlauf E_{ver} -optimierter Lichtverteilungen	70
Abbildung 5.10:	Typischer VL -Verlauf leuchtdichteoptimierter Lichtverteilungen	71
Abbildung 5.11:	Mittlere VL -Werte, erzielt mit $U_o(E_{ver})$ - und $U_o(L)$ - Optimierung	72
Abbildung 5.12:	Typisches Ergebnis einer homogenen Leuchtdichtevertellung.....	74
Abbildung 5.13:	Typisches Ergebnis einer gleichmäßigen Verteilung E_{hor}	74
Abbildung 5.14:	Charakteristische VL -Verläufe der U_o -orientierten Optimierungen in Abhängigkeit vom Lichtpunktabstand	75
Abbildung 5.15:	Übersicht Mediane VL in Abhängigkeit vom Mastabstand	76
Abbildung 5.16:	Übersicht minimale VL in Abhängigkeit vom Mastabstand	77
Abbildung 5.17:	Übersicht der Optimierungsverfahren, Deckschicht R2, Sehobjektreflexionsgrad 10 % bei 24 m Lichtpunktabstand.....	79
Abbildung 5.18:	Übersicht der Optimierungsverfahren, Deckschicht R3, Sehobjektreflexionsgrad 40 % bei 24 m Lichtpunktabstand.....	79
Abbildung 5.19:	Zusammenfassende Übersicht der mittleren und minimalen VL aller untersuchten Beleuchtungssituationen	81
Abbildung 5.20:	E_{hor} -Optimierung, 24 m, R3, dynamische Beobachtung.	82
Abbildung 5.21:	E_{ver} -Optimierung, 24 m, R3, dynamische Beobachtung	82
Abbildung 5.22:	L -Optimierung, 24 m R3, dynamische Beobachtung.....	83
Abbildung 5.23:	Realisierte Lichtstärkeverteilungskörper der VL -Optimierung und resultierende Gleichmäßigkeiten, Teil 1: Deckschicht R2.....	85
Abbildung 5.24:	Realisierte Lichtstärkeverteilungskörper der VL -Optimierung und resultierende Gleichmäßigkeiten, Teil 2: Deckschicht R3	86
Abbildung 5.25:	Typische Ausprägung einer VL -optimierten LVK	87
Abbildung 5.26:	Aus der VL -Optimierung resultierende Lichtverteilungen, R2- Fahrbahndeckschicht.....	89
Abbildung 5.27:	Aus der VL -Optimierung resultierende Lichtverteilungen, R3- Fahrbahndeckschicht.....	90
Abbildung 5.28:	VL -Optimierung, statische Beobachtung, Deckschicht R2	91
Abbildung 5.29:	VL -Optimierung, dynamische Beobachtung, Deckschicht R2.....	92
Abbildung 5.30:	VL -Optimierung, stationäre Beobachtung, Deckschicht R3	92
Abbildung 5.31:	Übersicht minimale $ VL $ und mittlere VL für stationäre und dynamische Beobachtung.....	93
Abbildung 5.32:	VL -Optimierung, dynamische Beobachtung, Deckschicht R3.....	94
Abbildung 5.33:	VL -Optimierung, Lichtpunktabstand 24 m, Sehobjektreflexionsgrad 20 % ...	95

Abbildung 5.34: <i>VL</i> -Optimierung, Lichtpunktstand 30 m, Sehobjektreflexionsgrad 40 %	95
Abbildung 5.35: Abhängigkeit des <i>STVL</i> vom Reflexionsgrad des Sehobjektes	98
Abbildung 5.36: Übersicht der resultierenden Schwellenwerterhöhungswerte <i>TI</i>	101
Abbildung 5.37: Übersicht des benötigten Lichtstromes zum Erreichen des vorgegebenen Beleuchtungsniveaus	103
Abbildung 6.1: Adaptive LED-Leuchte	105
Abbildung 6.2: Aufsicht Versuchsaufbau	106
Abbildung 6.3: Laborteppich aus Beobachterraichtung und entgegengesetzt	106
Abbildung 6.4: Ablaufdiagramm der Simulationen und realen Messungen	107
Abbildung 6.5: Messfeld mit zentralem Ausschnitt	108
Abbildung 6.6: Begrenzung der Ausleuchtung hinter dem Messfeld	108
Abbildung 6.7: Optimierungsziel und Referenz-LVK(RLVK) der ausgewählten Beleuchtungssituationen	109
Abbildung 6.8: Leuchtdichtebilder U_o -orientierte Optimierungen	111
Abbildung 6.9: Vogelperspektive der Leuchtdichtebilder, U_o -orientierte Optimierungen	111
Abbildung 6.10: Leuchtdichtebilder <i>VL</i> -orientierte Optimierungen	113
Abbildung 6.11: Vogelperspektive der Leuchtdichtebilder, <i>VL</i> -orientierte Optimierungen	113
Abbildung 6.12: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen	115
Abbildung 7.1: Leuchtdichteverteilung einer nicht geglätteten LVK auf der Fahrbahn	119
Abbildung 7.2: Vergleichsmessungen <i>L</i> -Kamera LMK 98-4 color mit kalibrierten Instrumenten zur Bestimmung von Leuchtdichten	125
Abbildung 7.3: Korrelation der Messgeräte untereinander	126
Abbildung A.1: Übersicht der in der Simulation untersuchten Beleuchtungsinstallationen	A-3
Abbildung A.2: Übersicht der Beleuchtungsszenen und Visibility-Level-Verläufe	A-4
Abbildung A.3: Übersicht der LED-Module zur Nachstellung im Versuch	A-27
Abbildung A.4: Leuchtenkonfigurator mit Angaben zur Anordnung der Module	A-29
Abbildung A.5: Gegenüberstellung der LVK E_{hor} , E_{ver} , L , Teil 1	A-30
Abbildung A.6: Gegenüberstellung der LVK E_{hor} , E_{ver} , L , Teil 2	A-31
Abbildung A.7: Gegenüberstellung der LVK E_{hor} , E_{ver} , L , Teil 3	A-32
Abbildung A.8: Gegenüberstellung der LVK E_{hor} , E_{ver} , L , Teil 4	A-33
Abbildung A.9: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen für $S_{rel} = 1/4$	A-34
Abbildung A.10: Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen für $S_{rel} = 1/5$	A-35
Abbildung A.11: Abweichungen simulierter <i>VL</i> zu im Labor gemessenen für $S_{rel} = 1/3$	A-36
Abbildung A.12: Abweichungen simulierter <i>VL</i> zu im Labor gemessenen für $S_{rel} = 1/4$	A-36
Abbildung A.13: Abweichungen simulierter <i>VL</i> zu im Labor gemessenen für $S_{rel} = 1/5$	A-36

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Berücksichtigte Fahrbahndeckschichtklassen	7
Tabelle 2.2:	Beziehung zwischen Alter und Faktor k	25
Tabelle 2.3:	Zuordnung von VL -Bereichen und Beurteilung innerhalb des Experiments von Dijon und Justin	32
Tabelle 3.2:	Lichttechnische Anforderungen an die in der Arbeit verwendeten Beleuchtungsklassen	42
Tabelle 3.1:	In der Parameterstudie untersuchte Beleuchtungsszenen.....	41
Tabelle 3.3:	Lage der Messpunkte längs des Bewertungsfeldes	42
Tabelle 3.4:	Kumulierte Häufigkeit der Wahrscheinlichkeit des Erkennens von Sehobjekten für die herangezogenen Sehobjektreflexionsgrade.....	44
Tabelle 3.5:	Angewandte Maßnahmen der Untersuchung	48
Tabelle 3.6:	Den Hauptoptimierungszielen zugeordnete Wirkungen	49
Tabelle 5.1:	VL -Optimierung, Gleichmäßigkeiten der Lichtverteilungen und Schwellenwerterhöhung der untersuchten Beleuchtungsszenen.....	88
Tabelle 5.2:	STV -Vorgaben für die untersuchten Straßenkategorien nach ANSI / IESNA RP-8-00	97
Tabelle 5.3:	Übersicht der STV -Werte, dynamische Beobachtung	99
Tabelle 6.1:	Untersuchte Maßnahmen (unabhängige Variablen) und deren Variationsumfang.....	104
Tabelle 6.2:	Übersicht der mit der adaptiven LED-Leuchte erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der Messung der horizontalen Beleuchtungsstärke.....	110
Tabelle 6.3:	Übersicht der mit der adaptiven LED-Leuchte erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der Messung der vertikalen Beleuchtungsstärke.....	110
Tabelle 6.4:	Übersicht der mit der adaptiven LED-Leuchte erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der Messung der Leuchtdichte	110
Tabelle 6.5:	Übersicht der erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der horizontalen Beleuchtungsstärke	112
Tabelle 6.6:	Übersicht der erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der vertikalen Beleuchtungsstärke	112
Tabelle 6.7:	Übersicht der erzielten Gleichmäßigkeiten anhand der Leuchtdichte.....	112

Tabelle 7.1:	Maximale Linearisierungsabweichung, abhängig vom Leuchtdichteniveau .	120
Tabelle 7.2:	Übersicht Stabilität der mit der LMK 984 Color gemessenen Leuchtdichten.....	124
Tabelle 7.3:	Unsicherheitsgrenzen für einzelne Merkmale und Gesamtunsicherheitsgrenzen für Leuchtdichtemessgeräte.....	125
Tabelle 7.4:	Übersicht der Unsicherheiten bei den Messungen im Lichtkanal.....	128
Tabelle A.1:	Randparameter Standard-R- und C-Straßendeckschichten.....	A-1
Tabelle A.2:	Betreute wissenschaftliche Arbeiten.....	A-2
Tabelle A.3:	Beleuchtungsinstallationen, -Szenen und VL-Verläufe	A-3
Tabelle A.4:	Resultierende Verteilungen der horizontalen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte, horizontale Beleuchtungsstärke	A-5
Tabelle A.5:	Resultierende Verteilungen der horizontalen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte, vertikale Beleuchtungsstärke	A-6
Tabelle A.6:	Resultierende Verteilungen der horizontalen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte, Leuchtdichte.....	A-7
Tabelle A.7:	Resultierende Verteilungen der horizontalen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte, Visibility Level	A-8
Tabelle A.8:	Übersicht Qualitätskennzahlen Erkennbarkeit für die stationäre Beobachtung, C-Deckschichten.....	A-9
Tabelle A.9:	Optimierung E_{hor} , Übersicht VL, stationäre Beobachtung, R1- und R4-Deckschichten.....	A-9
Tabelle A.10:	Optimierung E_{hor} , Übersicht Qualitätskennzahlen VL für die stationäre Beobachtung	A-10
Tabelle A.11:	Optimierung E_{hor} , Übersicht Qualitätskennzahlen VL für die dynamische Beobachtung	A-10
Tabelle A.12:	Optimierung E_{ver} , Übersicht VL, stationäre Beobachtung, C-Deckschichten.....	A-11
Tabelle A.13:	Optimierung E_{ver} , Übersicht VL, stationäre Beobachtung, R1- und R4-Deckschichten.....	A-11
Tabelle A.14:	Optimierung E_{ver} , Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, stationäre Beobachtung	A-12
Tabelle A.15:	Optimierung E_{ver} , Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, dynamische Beobachtung	A-12
Tabelle A.16:	Optimierung L, Übersicht Kennzahlen VL, stationäre Beobachtung, C-Deckschichten.....	A-13
Tabelle A.17:	Optimierung L, Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, stationäre Beobachtung, R1, R4.....	A-13
Tabelle A.18:	Optimierung L, Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, stationäre Beobachtung	A-14
Tabelle A.19:	Optimierung L, Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, dynamische Beobachtung	A-14

Tabelle A.20:	VL_{\min} -Werte und VL_{med} -Werte, stationäre und dynamische Beobachtung.....	A-15
Tabelle A.21:	Einfluss des Mastabstandes auf die Ergebnisse der VL -Optimierung.....	A-16
Tabelle A.22:	Vergleich $STVL$ -Werte, stationäre Beobachtung, Fahrspur 0.....	A-17
Tabelle A.23:	Vergleich $STVL$ -Werte, stationäre Beobachtung, Fahrspur 1.....	A-18
Tabelle A.24:	Übersicht Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, E_{hor}	A-19
Tabelle A.25:	Übersicht Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, E_{ver}	A-20
Tabelle A.26:	Übersicht Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, L	A-21
Tabelle A.27:	Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, VL stationär.....	A-22
Tabelle A.28:	Mastabstand Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, E_{hor} dynamisch.....	A-22
Tabelle A.29:	Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, E_{ver} dynamisch.....	A-23
Tabelle A.30:	Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, L dynamisch.....	A-23
Tabelle A.31:	Beispiele im Verlauf vergleichbarer VL -Verläufe. Betrachtung zum Erzielen eines mittleren VL nötigen mittleren horizontalen Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten.....	A-24
Tabelle A.32:	Einfluss des reflektierten Streulichtes auf die horizontale Beleuchtungsstärke unter simulierten Reflexionsgraden von $\rho_{\text{Wand}} = 0\%, 5\%, 10\%$	A-25
Tabelle A.33:	R -Tabelle Laborteppich, Beobachtungswinkel 1° , aufgeführt ist $R \cdot 10^4$, Teil 1.....	A-25
Tabelle A.34:	Laborteppich, Beobachtungswinkel 1°	A-26
Tabelle A.35:	R -Tabelle Laborteppich, Beobachtungswinkel 1° , aufgeführt ist $R \cdot 10^4$, Teil 2.....	A-26
Tabelle A.36:	R -Tabelle Laborteppich, Beobachtungswinkel 3° , aufgeführt ist $R \cdot 10^4$, Teil 1.....	A-26
Tabelle A.37:	R -Tabelle Laborteppich, Beobachtungswinkel 3° , aufgeführt ist $R \cdot 10^4$, Teil 2.....	A-27
Tabelle A.38:	Laborteppich, Beobachtungswinkel 3°	A-27
Tabelle A.39:	Konfiguration der LED-Leuchte im Laborversuch.....	A-28
Tabelle A.40:	Unsicherheitsgrenzen Beleuchtungsstärkemessgeräte.....	A-37

A

TABELLEN UND ÜBERSICHTEN

A.1 RANDPARAMETER STANDARD-R- UND -C-DECKSCHICHTEN

Tabelle A.1: Randparameter Standard-R- und C-Straßendeckschichten [YLINEN ET AL. 2010, S. 80; CIE 1984, S. 70].

Standard table	S1-limit	S1 of standard	Normalised q_0 value
R1	$S1 < 0.42$	0.25	0.10
R2	$0.42 \leq S1 < 0.85$	0.58	0.07
R3	$0.85 \leq S1 < 1.35$	1.11	0.07
R4	$1.35 \leq S1$	1.55	0.08
N1	$S1 < 0.28$	0.18	0.10
N2	$0.28 \leq S1 < 0.60$	0.41	0.07
N3	$0.60 \leq S1 < 1.30$	0.88	0.07
N4	$1.30 \leq S1$	1.61	0.08
C1	$S1 < 0.40$	0.24	0.10
C2	$S1 \geq 0.4$	0.97	0.07
W1	$S1' < 9.6$	5.8	0.088
W2	$9.6 \leq S1' < 26.5$	16	0.091
W3	$26.5 \leq S1' < 73$	44	0.097
W4	$73 \leq S1' < 200$	121	0.104

A.2 BETREUTE STUDENTISCHE ARBEITEN

Tabelle A.2 : *Betreute wissenschaftliche Arbeiten, von denen die farblich hinterlegten maßgeblich an den hier vorgestellten Forschungen und Entwicklungen beteiligt sind.*

<i>Autor</i>	<i>Titel</i>	<i>Art³⁰</i>	<i>Datum</i>
KRENZ, PETER [2009]	Bestimmung von Kriterien zur Bewertung innovativer Straßenbeleuchtung anhand des Gütekriteriums Leuchtdichte	S	06/2009
KRENZ, PETER [2010]	Entwicklung der Empfehlung für innovative Straßenbeleuchtung anhand des Gütemerkmals Objektkontrast	D	03/2010
PSYRIDIS, EMANOUIL [2010]	Development of a perception-optimised road lighting concept with the help of the quality criterion object contrast taking into account energy-efficient operating methods and the recommendations of EN 13201	M	12/2010
BUSCHMANN, SANDY [2012]	Optimierung des Netzmanagements für verkehrsflussadaptive Straßenbeleuchtung in Berlin	S	01/2012
BREMER, SEBASTIAN [2012]	Prüfung der Anwendbarkeit des Visibility Concept zur praxisnahen Bewertung und Planung von Straßenbeleuchtungsanlagen mit niedrigem Beleuchtungsniveau	B	01/2012
LE, HUU THANH HA [2012]	Simulation und Bewertung von Sehobjektkontrastverläufen in der Lichtplanungsumgebung DIALux	B	05/2012
YAHYAOU, ANIS [2012]	Entwicklung eines Simulationsverfahrens zur Analyse des Zusammenwirkens aus Kfz-Beleuchtung und ortsfester Straßenbeleuchtung mittels der Raytracing-Software Radiance	D	05/2012
CHRISTENFELDT, MARC [2012]	Analyse & Bewertung von Sensoriksystemen für adaptive Straßenbeleuchtungssysteme	S	11/2012
SCHEIBLER, BEATE [2013]	Innovative Straßenbeleuchtung zur Verbesserung von Sichtbarkeit und Energieeffizienz: Konfiguration von Referenz-Lichtverteilungen und deren praktische Realisierung mit einer adaptiven LED-Leuchte	B	07/2013
STEBLAU, JURI [2013]	Optimierung von Lichtstärkeverteilungskörpern auf die Erkennbarkeit einfacher Sehobjekte	D	08/2013
JOCKISCH, LUKAS [2013]	Entwicklung und Einrichtung eines Versuchstandes zur Bewertung von Sicherheit und Energieeffizienz örtlich adaptiver LED-Leuchten	B	09/2013
LU, YU-WEN [2013]	Validierung der Optimierungssoftware LiDot durch Auswertung generierter Referenz-Lichtstärkeverteilungskörper	S	11/2013
LU, YU-WEN [2013]	Analyse von Simulationen zur Optimierung von Lichtverteilungen in der ortsfesten Straßenbeleuchtung	D	03/2014
FRAUNHOFER, MARTIN [2015]	Messtechnische Validierung der praktischen Umsetzung simulierter Lichtstärkeverteilungskörper	D	voraussichtlich 2015

³⁰ B: Bachelorarbeit | D: Diplomarbeit | M: Masterarbeit | S: Studienarbeit

A.3 ÜBERSICHT DER GESAMTEN PARAMETERVARIATION

Tabelle A.3 : Beleuchtungsinstallationen, -Szenen und VL-Verläufe nach Untersuchungsschwerpunkten.

Schwerpunkt	Beleuchtungsinstallationen	Beleuchtungs-szenen	VL-Verläufe
Stationäre Beobachtung	78	240	480
Dynamische Beobachtung	42	96	192
Jeweilige U_o -orientierte Optimierung, statisch	18	72	144
Jeweilige U_o -orientierte Optimierung, dynamisch	6	24	48
VL-Optimierung, je statisch oder dynamisch	24	24	48

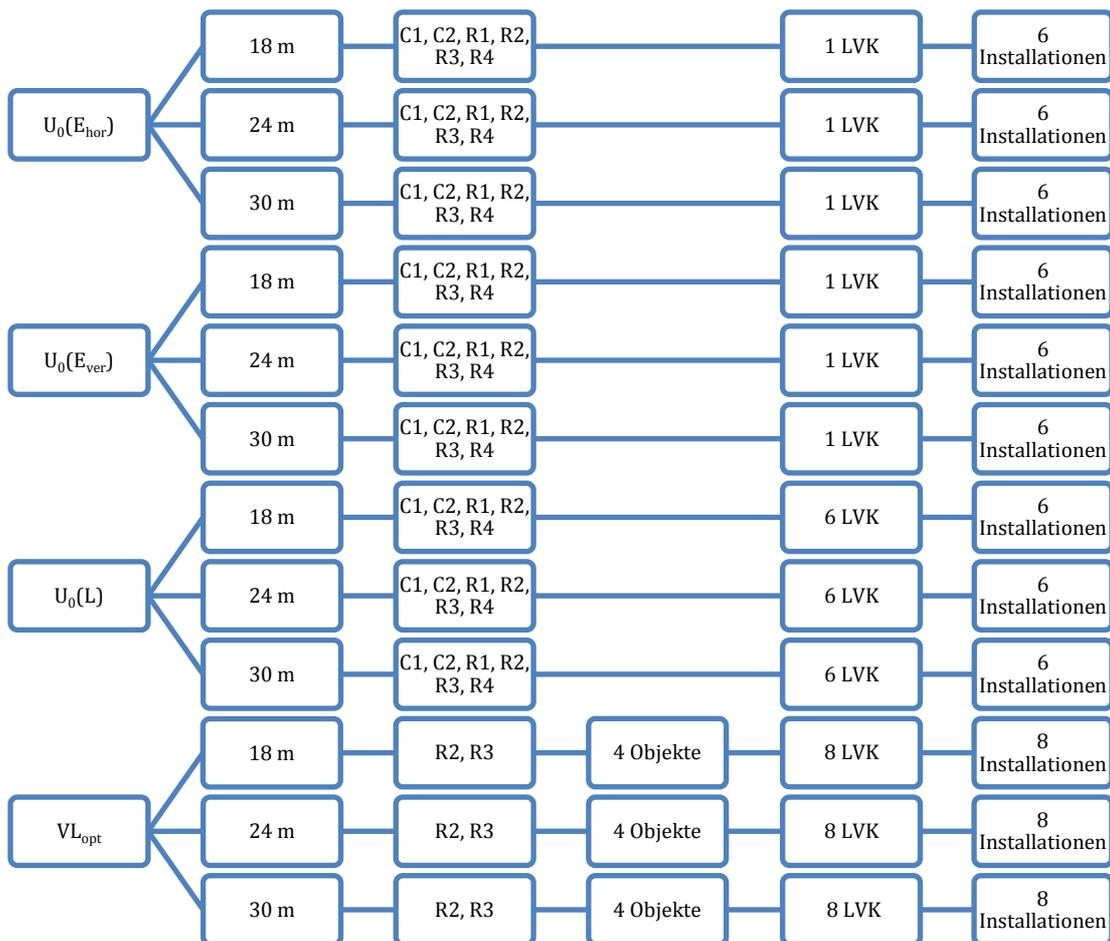


Abbildung A.1: Übersicht der in der Simulation untersuchten 78 Beleuchtungsinstallationen.

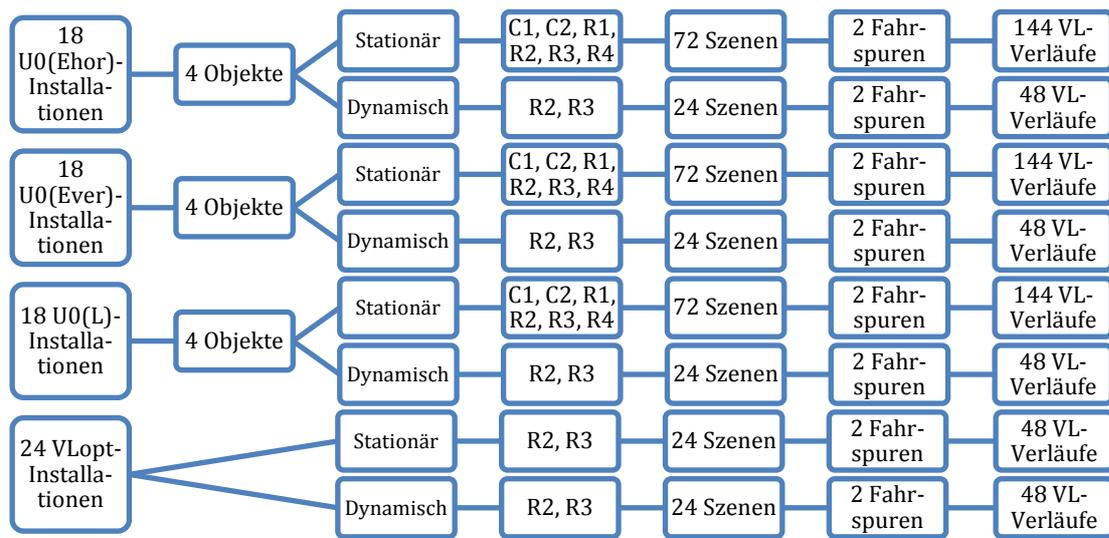


Abbildung A.2: Übersicht der 336 Beleuchtungsszenen und 672 Visibility-Level-Verläufe.

A.4 ÜBERSICHT ERGEBNISSE LICHTVERTEILUNGEN

Tabelle A.4: Aus der Optimierung auf eine gleichmäßige horizontale Beleuchtungsstärke resultierende Verteilungen der horizontalen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte, Qualitätskennzahlen.

S _{rel} = 1/3 (18 m)												
	Fahrspur 0						Fahrspur 1					
	R1	R2	R3	R4	C1	C2	R1	R2	R3	R4	C1	C2
L _{min} [cd/m ²]	0,65	0,37	0,27	0,23	0,73	0,32	0,65	0,37	0,27	0,23	0,73	0,31
L _{max} [cd/m ²]	1,02	0,83	0,85	0,82	1,07	0,83	1,21	1,41	1,74	1,99	1,39	1,79
\bar{L} [cd/m ²]	0,83	0,54	0,46	0,44	0,89	0,52	0,83	0,54	0,46	0,44	0,89	0,52
U _{o,L}	0,78	0,66	0,58	0,51	0,82	0,59	0,78	0,66	0,58	0,51	0,82	0,59
U _{l,L}	0,78	0,59	0,47	0,4	0,82	0,51	0,78	0,59	0,47	0,4	0,82	0,51
E _{hor,min}	10,26						10,26					
E _{hor,max}	10,26						10,26					
\bar{E}_{hor}	10,26						10,26					
U _{o,Ehor}	1						1					
U _{l,Ehor}	1						1					
S _{rel} = 1/4 (24 m)												
	Fahrspur 0						Fahrspur 1					
	R1	R2	R3	R4	C1	C2	R1	R2	R3	R4	C1	C2
L _{min} [cd/m ²]	0,66	0,37	0,27	0,23	0,73	0,32	0,66	0,37	0,27	0,23	0,73	0,31
L _{max} [cd/m ²]	1,22	0,83	0,85	0,82	1,07	0,83	1,64	2,16	3,03	3,65	1,88	2,96
\bar{L} [cd/m ²]	0,93	0,65	0,6	0,6	0,97	0,64	0,93	0,65	0,59	0,6	0,97	0,64
U _{o,L}	0,71	0,56	0,43	0,37	0,75	0,47	0,71	0,56	0,43	0,37	0,75	0,47
U _{l,L}	0,69	0,48	0,33	0,26	0,73	0,37	0,69	0,48	0,33	0,26	0,73	0,37
E _{hor,min}	10,26						10,26					
E _{hor,max}	10,26						10,26					
\bar{E}_{hor}	10,26						10,26					
U _{o,Ehor}	1						1					
U _{l,Ehor}	1						1					
S _{rel} = 1/5 (30 m)												
	Fahrspur 0						Fahrspur 1					
	R1	R2	R3	R4	C1	C2	R1	R2	R3	R4	C1	C2
L _{min} [cd/m ²]	0,67	0,37	0,27	0,23	0,71	0,32	0,67	0,37	0,27	0,23	0,71	0,31
L _{max} [cd/m ²]	1,49	1,41	1,62	1,83	1,34	1,38	2,15	3,2	4,69	6,05	2,49	4,45
\bar{L} [cd/m ²]	1,04	0,78	0,77	0,82	1,07	0,79	1,04	0,78	0,77	0,82	1,07	0,79
U _{o,L}	0,63	0,46	0,33	0,27	0,65	0,38	0,63	0,46	0,33	0,27	0,65	0,38
U _{l,L}	0,59	0,36	0,23	0,17	0,61	0,27	0,59	0,36	0,23	0,17	0,61	0,27
E _{hor,min}	10,26						10,26					
E _{hor,max}	10,26						10,26					
\bar{E}_{hor}	10,26						10,26					
U _{o,Ehor}	1						1					
U _{l,Ehor}	1						1					

Tabelle A.5: Aus der Optimierung auf eine gleichmäßige vertikale Beleuchtungsstärke resultierende Verteilungen der horizontalen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte, Qualitätskennzahlen.

$S_{rel} = 1/3 (18 \text{ m})$												
	Fahrspur 0						Fahrspur 1					
	R1	R2	R3	R4	C1	C2	R1	R2	R3	R4	C1	C2
$L_{min} [\text{cd/m}^2]$	0,75	0,49	0,46	0,46	0,66	0,45	0,74	0,46	0,42	0,43	0,64	0,42
$L_{max} [\text{cd/m}^2]$	1,55	1,13	1,1	1,17	1,57	1,06	2,52	2,37	2,94	4,17	2,95	2,87
$\bar{L} [\text{cd/m}^2]$	1,44	1,12	1,16	1,29	1,49	1,17	1,44	1,12	1,16	1,29	1,49	1,17
$U_{o,L}$	0,5	0,41	0,36	0,33	0,43	0,36	0,5	0,41	0,36	0,33	0,43	0,36
$U_{l,L}$	0,77	0,76	0,56	0,46	0,72	0,61	0,77	0,76	0,56	0,46	0,72	0,61
$E_{hor,min} [\text{lx}]$	5,2						5,2					
$E_{hor,max} [\text{lx}]$	16,45						26,49					
$\bar{E}_{hor} [\text{lx}]$	13,5						13,5					
$U_{o,Ehor}$	0,39						0,39					
$U_{l,Ehor}$	0,32						0,2					
$S_{rel} = 1/4 (24 \text{ m})$												
	Fahrspur 0						Fahrspur 1					
	R1	R2	R3	R4	C1	C2	R1	R2	R3	R4	C1	C2
$L_{min} [\text{cd/m}^2]$	0,8	0,53	0,46	0,46	0,73	0,52	0,77	0,49	0,46	0,46	0,7	0,47
$L_{max} [\text{cd/m}^2]$	1,49	1,03	1,19	1,5	1,5	1,05	2,39	2,64	3,5	5,75	2,75	3,1
$\bar{L} [\text{cd/m}^2]$	1,37	1,17	1,31	1,59	1,4	1,26	1,37	1,17	1,31	1,59	1,4	1,26
$U_{o,L}$	0,56	0,42	0,33	0,26	0,5	0,37	0,56	0,42	0,33	0,26	0,5	0,37
$U_{l,L}$	0,8	0,65	0,49	0,39	0,77	0,57	0,8	0,65	0,49	0,39	0,77	0,57
$E_{hor,min} [\text{lx}]$	4,6						4,6					
$E_{hor,max} [\text{lx}]$	14,22						20,09					
$\bar{E}_{hor} [\text{lx}]$	10,7						10,7					
$U_{o,Ehor}$	0,43						0,43					
$U_{l,Ehor}$	0,32						0,23					
$S_{rel} = 1/5 (30 \text{ m})$												
	Fahrspur 0						Fahrspur 1					
	R1	R2	R3	R4	C1	C2	R1	R2	R3	R4	C1	C2
$L_{min} [\text{cd/m}^2]$	0,49	0,33	0,43	0,43	0,38	0,38	0,41	0,25	0,39	0,34	0,29	0,29
$L_{max} [\text{cd/m}^2]$	1,48	1,13	1,35	1,63	1,5	1,16	2,35	2,85	3,64	6,16	2,56	3,25
$\bar{L} [\text{cd/m}^2]$	1,28	1,18	1,39	1,82	1,3	1,28	1,26	1,15	1,34	1,72	1,27	1,24
$U_{o,L}$	0,32	0,21	0,3	0,19	0,23	0,23	0,32	0,21	0,3	0,2	0,23	0,23
$U_{l,L}$	0,51	0,52	0,43	0,32	0,41	0,53	0,51	0,52	0,43	0,32	0,41	0,53
$E_{hor,min} [\text{lx}]$	2,9						2,9					
$E_{hor,max} [\text{lx}]$	12,46						15,9					
$\bar{E}_{hor} [\text{lx}]$	8,7						8,7					
$U_{o,Ehor}$	0,34						0,34					
$U_{l,Ehor}$	0,23						0,18					

Tabelle A.6: Aus der Optimierung auf eine gleichmäßige Leuchtdichte resultierende Verteilungen der horizontalen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte, Qualitätskennzahlen.

S _{rel} = 1/3 (18 m)												
	Fahrspur 0						Fahrspur 1					
	R1	R2	R3	R4	C1	C2	R1	R2	R3	R4	C1	C2
L _{min} [cd/m ²]	0,65	0,7	0,67	0,63	0,69	0,67	0,66	0,73	0,68	0,68	0,59	0,69
L _{max} [cd/m ²]	0,88	0,99	0,98	1	0,96	1,05	0,9	0,88	0,92	0,94	0,94	0,93
\bar{L} [cd/m ²]	0,79	0,79	0,77	0,77	0,79	0,77	0,79	0,79	0,77	0,77	0,79	0,77
U _{o,L}	0,81	0,86	0,82	0,77	0,74	0,83	0,81	0,89	0,85	0,83	0,74	0,86
U _{i,L}	0,88	0,9	0,92	0,9	0,87	0,88	0,88	0,9	0,92	0,9	0,87	0,88
E _{hor,min} [lx]	4,7	7,3	6,5	6	5	6,3	4,7	7,3	6,5	6	5	6,3
E _{hor,max} [lx]	8,5	17,24	24,49	28,33	9,67	19,35	9,88	18,5	24,47	27,73	9,28	20,94
\bar{E}_{hor} [lx]	7,4	12,7	16,4	17,1	7,8	14	7,4	12,7	16,4	17,1	7,8	14
U _{o,Ehor}	0,64	0,57	0,39	0,35	0,65	0,45	0,64	0,57	0,39	0,35	0,65	0,45
U _{i,Ehor}	0,55	0,42	0,27	0,21	0,52	0,33	0,48	0,39	0,27	0,22	0,54	0,3
S _{rel} = 1/4 (24 m)												
	Fahrspur 0						Fahrspur 1					
	R1	R2	R3	R4	C1	C2	R1	R2	R3	R4	C1	C2
L _{min} [cd/m ²]	0,69	0,63	0,6	0,57	0,71	0,58	0,69	0,69	0,67	0,64	0,65	0,66
L _{max} [cd/m ²]	0,91	0,94	0,98	1,02	0,87	0,98	0,98	0,96	0,94	1,06	0,99	1,03
\bar{L} [cd/m ²]	0,79	0,77	0,75	0,76	0,79	0,77	0,79	0,77	0,76	0,76	0,79	0,77
U _{o,L}	0,87	0,79	0,74	0,7	0,82	0,71	0,87	0,85	0,8	0,78	0,82	0,79
U _{i,L}	0,9	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,9	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91
E _{hor,min} [lx]	5	4,8	3,9	3,2	4,6	3,8	5	4,8	3,9	3,2	4,6	3,8
E _{hor,max} [lx]	9,39	18,23	25,23	29,19	9,48	19,76	10,29	18,22	23,78	25,93	9,41	19,88
\bar{E}_{hor} [lx]	7,5	11,7	14	14,6	7,5	12,7	7,5	11,7	14	14,6	7,5	12,7
U _{o,Ehor}	0,67	0,41	0,28	0,22	0,62	0,3	0,67	0,41	0,28	0,22	0,62	0,3
U _{i,Ehor}	0,53	0,26	0,15	0,11	0,49	0,19	0,49	0,26	0,16	0,12	0,49	0,19
S _{rel} = 1/5 (30 m)												
	Fahrspur 0						Fahrspur 1					
	R1	R2	R3	R4	C1	C2	R1	R2	R3	R4	C1	C2
L _{min} [cd/m ²]	0,71	0,6	0,53	0,51	0,7	0,56	0,71	0,68	0,63	0,62	0,71	0,66
L _{max} [cd/m ²]	0,82	0,9	0,94	1,14	0,94	0,91	0,89	1,03	1,01	1,21	0,93	1,12
\bar{L} [cd/m ²]	0,76	0,76	0,75	0,75	0,78	0,76	0,76	0,76	0,75	0,75	0,78	0,76
U _{o,L}	0,92	0,75	0,65	0,62	0,87	0,68	0,92	0,83	0,75	0,72	0,88	0,75
U _{i,L}	0,93	0,88	0,87	0,88	0,88	0,87	0,93	0,88	0,87	0,88	0,88	0,87
E _{hor,min} [lx]	4	3,3	2,6	2	3,7	2,6	4	3,3	2,6	2	3,7	2,6
E _{hor,max} [lx]	9,73	17,03	23,2	27,86	9,64	18,29	10,81	17,46	22,81	24,26	9,52	19,11
\bar{E}_{hor} [lx]	7,3	10,3	12,1	12,2	7,3	10,9	7,3	10,3	12,1	12,2	7,3	10,9
U _{o,Ehor}	0,55	0,32	0,22	0,16	0,51	0,23	0,55	0,32	0,22	0,16	0,51	0,23
U _{i,Ehor}	0,41	0,19	0,11	0,07	0,38	0,14	0,37	0,19	0,11	0,08	0,39	0,14

Tabelle A.7: Aus der Optimierung auf das Visibility Level resultierende Verteilungen der horizontalen Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte, Qualitätskennzahlen.

$S_{rel} = 1/3 (18 m)$																
	Fahrspur 0								Fahrspur 1							
	R2				R3				R2				R3			
	6,5 %	10 %	20 %	40 %	6,5 %	10 %	20 %	40 %	6,5 %	10 %	20 %	40 %	6,5 %	10 %	20 %	40 %
$L_{min} [cd/m^2]$	0,63	0,5	0,4	0,4	0,53	0,57	0,61	0,5	0,6	0,5	0,4	0,42	0,64	0,64	0,65	0,5
$L_{max} [cd/m^2]$	0,94	1,06	1,44	2,13	0,96	1,03	1,31	1,98	0,91	1,11	1,16	1,3	1,22	1,25	1,03	0,73
$\bar{L} [cd/m^2]$	0,77	0,77	0,77	0,81	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,81	0,77	0,77	0,77	0,77
$U_{o,L}$	0,78	0,65	0,52	0,48	0,65	0,71	0,74	0,63	0,78	0,65	0,52	0,5	0,72	0,72	0,77	0,62
$U_{l,L}$	0,9	0,69	0,52	0,46	0,85	0,84	0,8	0,56	0,9	0,69	0,52	0,45	0,85	0,84	0,8	0,56
$E_{hor,min} [lx]$	7,01	6,71	5,66	4,69	5,9	5,9	5,98	4,92	7,01	6,71	5,66	4,69	5,9	5,9	5,98	4,92
$E_{hor,max} [lx]$	17,61	19,49	32,99	49,21	27,39	27,48	42,15	65,28	18,17	18,99	14,41	31,28	26,23	26,22	22,75	19,38
$\bar{E}_{hor} [lx]$	12,52	12,69	13,25	15,49	16,43	16,4	17	17,95	12,52	12,69	13,25	15,49	16,43	16,4	17	17,95
$U_{o,Ehor}$	0,56	0,53	0,43	0,3	0,36	0,36	0,35	0,27	0,56	0,53	0,43	0,3	0,36	0,36	0,35	0,27
$U_{l,Ehor}$	0,4	0,34	0,17	0,1	0,22	0,21	0,14	0,08	0,39	0,35	0,39	0,15	0,22	0,23	0,26	0,25
$S_{rel} = 1/4 (24 m)$																
	Fahrspur 0								Fahrspur 1							
	R2				R3				R2				R3			
	6,5 %	10 %	20 %	40 %	6,5 %	10 %	20 %	40 %	6,5 %	10 %	20 %	40 %	6,5 %	10 %	20 %	40 %
$L_{min} [cd/m^2]$	0,38	0,64	0,4	0,51	0,53	0,53	0,51	0,43	0,37	0,66	0,4	0,51	0,66	0,66	0,61	0,5
$L_{max} [cd/m^2]$	1,06	0,83	1,85	1,81	1,24	1,24	1,78	1,74	0,98	0,83	1,58	1,05	1,09	1,09	1,16	0,79
$\bar{L} [cd/m^2]$	0,77	0,75	0,77	0,78	0,82	0,82	0,76	0,74	0,77	0,75	0,77	0,78	0,82	0,82	0,75	0,74
$U_{o,L}$	0,47	0,83	0,5	0,65	0,61	0,61	0,63	0,54	0,47	0,83	0,5	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64
$U_{l,L}$	0,62	0,9	0,5	0,62	0,79	0,79	0,75	0,64	0,62	0,9	0,5	0,62	0,79	0,79	0,76	0,67
$E_{hor,min} [lx]$	4,37	4,73	3,63	3,87	3,83	3,83	3,32	3,19	4,37	4,73	3,63	3,87	3,83	3,83	3,32	3,19
$E_{hor,max} [lx]$	21	18,79	45,3	42,42	33,78	33,77	62,34	49,02	19,34	17,84	39,35	25,88	27,06	27,06	22,16	22,52
$\bar{E}_{hor} [lx]$	12,03	11,8	14,6	13,34	15,72	15,72	14,62	15,03	12,03	11,8	14,6	13,34	15,72	15,72	14,62	15,03
$U_{o,Ehor}$	0,36	0,4	0,25	0,29	0,24	0,24	0,23	0,21	0,36	0,4	0,25	0,29	0,24	0,24	0,23	0,21
$U_{l,Ehor}$	0,21	0,25	0,08	0,09	0,11	0,11	0,05	0,07	0,23	0,27	0,09	0,15	0,14	0,14	0,15	0,14
$S_{rel} = 1/5 (30 m)$																
	Fahrspur 0								Fahrspur 1							
	R2				R3				R2				R3			
	6,5 %	10 %	20 %	40 %	6,5 %	10 %	20 %	40 %	6,5 %	10 %	20 %	40 %	6,5 %	10 %	20 %	40 %
$L_{min} [cd/m^2]$	0,39	0,54	0,37	0,41	0,44	0,44	0,62	0,39	0,62	0,66	0,58	0,55	0,6	0,6	0,62	0,53
$L_{max} [cd/m^2]$	1,02	1,12	2,25	1,52	1,15	1,3	1,64	1,2	0,92	0,97	1,14	0,85	1,03	1,03	1,45	0,8
$\bar{L} [cd/m^2]$	0,79	0,84	0,77	0,8	0,82	0,83	0,74	0,71	0,79	0,84	0,79	0,81	0,82	0,84	0,75	0,71
$U_{o,L}$	0,47	0,61	0,45	0,49	0,5	0,49	0,59	0,5	0,67	0,67	0,57	0,66	0,56	0,54	0,57	0,54
$U_{l,L}$	0,8	0,79	0,66	0,66	0,74	0,67	0,87	0,72	0,8	0,79	0,69	0,62	0,74	0,67	0,75	0,77
$E_{hor,min} [lx]$	3,1	3,28	2,82	3,14	2,37	2,37	2,32	2,13	3,1	3,28	2,82	3,14	2,37	2,37	2,32	2,13
$E_{hor,max} [lx]$	22,6	23,93	53,37	36,52	32,4	39,8	55,7	36,73	19,23	20,37	14,06	20,56	25,32	25,32	21,6	25,08
$\bar{E}_{hor} [lx]$	11,27	12,03	11,42	12,13	13,92	14,8	12,07	12,41	11,27	12,03	11,42	12,13	13,92	14,8	12,07	12,41
$U_{o,Ehor}$	0,28	0,27	0,25	0,26	0,17	0,16	0,19	0,17	0,28	0,27	0,25	0,26	0,17	0,16	0,19	0,17
$U_{l,Ehor}$	0,14	0,14	0,05	0,09	0,07	0,06	0,04	0,06	0,16	0,16	0,2	0,15	0,09	0,09	0,11	0,08

A.5 ÜBERSICHTEN ERGEBNISSE ERKENNBARKEITEN

A.5.1 HORIZONTAL BELEUCHTUNGSSTÄRKE

Tabelle A.8: Optimierung Gesamtgleichmäßigkeit horizontale Beleuchtungsstärke, Übersicht Qualitätskennzahlen Erkennbarkeit für die stationäre Beobachtung, C-Deckschichten.

Stationäre Beobachtung, C1 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	5,78	4,27	-	-	4,51	2,64	-	-	3,42	1,40	-	-
\overline{VL}_{S0}	-7,40	-6,92	-5,55	-3,47	-6,77	-6,18	-4,64	-2,27	-6,49	-5,83	-4,16	-1,47
$VL_{med,S0}$	-7,07	-7,06	-6,57	-6,51	-7,07	-6,79	-6,21	-5,63	-6,34	-6,34	-5,87	-5,81
$ VL _{min,S1}$	5,51	3,99	-	-	4,37	2,51	-	-	3,52	1,34	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,74	-7,26	-5,91	-3,86	-7,48	-6,93	-5,48	-3,19	-7,62	-7,00	-5,46	-2,93
$VL_{med,S1}$	-7,92	-7,61	-7,21	-7,18	-8,05	-7,82	-7,27	-7,27	-7,41	-7,41	-7,41	-7,07

Stationäre Beobachtung, C2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	0,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-4,92	-4,21	-2,64	0,17	-4,64	-3,92	-2,12	1,13	-4,48	-3,69	-1,68	2,05
$VL_{med,S0}$	-5,54	-5,50	-5,46	-4,73	-5,44	-5,21	-5,21	-4,71	-5,22	-5,22	-5,10	-4,09
$ VL _{min,S1}$	0,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-5,53	-4,86	-3,30	-0,35	-6,15	-5,53	-3,83	-0,79	-6,83	-6,18	-4,52	-1,43
$VL_{med,S1}$	-5,76	-5,57	-5,55	-5,51	-6,93	-6,51	-5,98	-5,98	-7,42	-7,42	-7,41	-6,84

$|VL| < 1,00$ ■ $VL \geq 1,00$ ■ $VL \leq -1,00$ ■

Tabelle A.9: Optimierung E_{hor} , Übersicht VL, stationäre Beobachtung, R1- und R4-Deckschichten.

Stationäre Beobachtung, R1 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	4,86	3,28	-	-	3,90	1,96	-	-	3,15	0,83	-	-
\overline{VL}_{S0}	-7,21	-6,72	-5,34	-3,25	-6,72	-6,13	-4,64	-2,25	-6,70	-6,00	-4,53	-1,58
$VL_{med,S0}$	-7,32	-7,13	-6,55	-6,46	-7,28	-6,87	-6,35	-6,03	-6,54	-6,53	-6,17	-6,11
$ VL _{min,S1}$	4,75	3,12	-	-	3,64	1,81	-	-	3,05	0,82	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,24	-6,72	-5,32	-3,23	-7,02	-6,44	-5,00	-2,61	-7,24	-6,60	-5,04	-2,43
$VL_{med,S1}$	-7,57	-7,23	-6,87	-6,82	-7,75	-7,37	-6,97	-6,97	-7,22	-7,22	-7,12	-6,94

Stationäre Beobachtung, R4 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-3,98	-3,28	-1,50	1,81	-4,11	-3,32	-1,34	2,37	-4,28	-3,47	-1,30	2,76
$VL_{med,S0}$	-4,76	-4,75	-4,70	-3,61	-5,01	-5,01	5,01	-4,45	-5,24	-5,24	-4,68	-3,74
$ VL _{min,S1}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-4,88	-4,20	-2,44	0,86	-5,85	-5,18	-3,33	0,03	-7,08	-6,31	-4,63	-1,39
$VL_{med,S1}$	-5,13	-5,12	-5,07	-4,98	-6,89	-6,46	-5,47	-5,47	-7,90	-7,89	-7,89	-7,87

$|VL| < 1,00$ ■ $VL \geq 1,00$ ■ $VL \leq -1,00$ ■

Tabelle A.10: Optimierung E_{hor} , Übersicht Qualitätskennzahlen VL für die stationäre Beobachtung.

Stationäre Beobachtung, R2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	2,15	0,02	-	-	1,06	-	-	-	0,01	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-5,29	-4,60	-3,07	-0,47	-4,99	-4,26	-2,57	0,45	-4,91	-4,14	-2,29	1,17
$VL_{med,S0}$	-5,60	-5,38	-5,38	-4,64	-5,58	-5,23	-5,23	-4,67	-5,46	-5,45	-5,25	-4,68
$ VL _{min,S1}$	1,18	-	-	-	0,47	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-5,82	-5,14	-3,65	-0,90	-6,07	-5,06	-3,81	-0,89	-6,51	-5,94	-4,28	-1,24
$VL_{med,S1}$	-6,47	-6,06	-6,17	-5,77	-6,64	-6,02	-6,35	-6,35	-6,94	-6,91	-6,91	-6,20

Stationäre Beobachtung, R3 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-4,32	-3,61	-1,96	1,10	-4,26	-3,52	-1,61	1,90	-4,33	-3,53	-1,45	2,50
$VL_{med,S0}$	-5,06	-5,06	-4,97	-3,92	-5,04	-5,03	-5,03	-4,57	-5,16	-5,15	-4,76	-3,70
$ VL _{min,S1}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-5,01	-4,32	-2,62	0,47	-5,75	-5,10	-3,28	0,03	-6,85	-6,15	-4,48	-1,33
$VL_{med,S1}$	-5,17	-5,16	-5,14	-5,10	-6,53	-6,10	-5,50	-5,50	-7,54	-7,52	-7,53	-7,14

$|VL| < 1,00$ ■ $VL \geq 1,00$ ■ $VL \leq -1,00$ ■

Tabelle A.11: Optimierung E_{hor} , Übersicht Qualitätskennzahlen VL für die dynamische Beobachtung.

Dynamische Beobachtung, R2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	2,9	-	-	-	1,38	-	-	-	1,36	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,91	-6,07	-4,29	-1,23	-6,69	-5,18	-3,91	-0,40	-7,56	-6,53	-4,19	-0,06
$VL_{med,S0}$	-8,02	-7,84	-7,34	-6,33	-8,46	-8,28	-7,75	-6,57	-8,69	-8,44	-7,75	-6,35
$ VL _{min,S1}$	1,75	-	-	-	1,52	-	-	-	3,5	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,47	-6,68	-4,96	-1,87	-7,95	-7,16	-5,34	-2,06	-9,58	-8,69	-6,65	-3,09
$VL_{med,S1}$	-8,54	-8,40	-8,00	-7,19	-9,08	-9,03	-8,83	-8,04	-10,02	-9,84	-8,68	-6,46

Dynamische Beobachtung, R3 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	0,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-5,74	-4,92	-3,01	0,49	-5,63	-4,77	-2,64	1,36	-6,60	-5,57	-3,00	1,63
$VL_{med,S0}$	-7,27	-7,09	-6,56	-5,51	-7,44	-7,41	-6,78	-5,53	-7,58	-6,91	-6,00	-4,22
$ VL _{min,S1}$	-	-	-	-	-	-	-	-	2,06	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-6,75	-5,92	-4,05	-0,48	-7,67	-6,92	-4,98	-1,43	-9,72	-8,89	-6,84	-3,15
$VL_{med,S1}$	-7,87	-7,75	-7,30	-6,45	-9,06	-8,68	-8,50	-8,35	-10,65	-10,03	-8,94	-6,64

$|VL| < 1,00$ ■ $VL \geq 1,00$ ■ $VL \leq -1,00$ ■

A.5.2 VERTIKALE BELEUCHTUNGSSTÄRKE

Tabelle A.12: Optimierung E_{ver} , Übersicht VL, stationäre Beobachtung, C-Deckschichten.

Stationäre Beobachtung, C1 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	6,04	5,30	3,18	-	4,83	4,10	2,02	-	4,66	3,92	1,78	-
\overline{VL}_{S0}	-7,87	-7,12	-5,00	-0,83	-6,90	-6,11	-3,85	0,37	-6,28	-5,48	-3,22	0,72
$VL_{med,S0}$	-7,82	-7,04	-4,81	-0,24	-7,00	-6,19	-3,79	0,67	-5,64	-4,80	-2,42	1,49
$ VL _{min,S1}$	8,08	7,45	5,65	1,99	6,58	6,01	4,40	0,96	6,09	5,52	3,90	0,61
\overline{VL}_{S1}	-10,13	-9,46	-7,53	-3,68	-9,28	-8,60	-6,71	-2,93	-8,56	-7,95	-6,19	-2,68
$VL_{med,S1}$	-10,18	-9,53	-7,67	-3,96	-9,62	-9,01	-7,26	-3,26	-8,45	-7,84	-6,07	-2,57

Stationäre Beobachtung, C2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	3,85	2,78	-	-	3,28	2,34	-	0,62	3,06	2,10	-	-
\overline{VL}_{S0}	-5,62	-4,60	-1,68	2,58	-5,22	-4,15	-1,15	3,17	-4,78	-3,77	-0,94	3,05
$VL_{med,S0}$	-5,59	-4,53	-1,45	2,82	-5,22	-4,13	-0,94	3,35	-4,21	-3,13	-0,04	3,87
$ VL _{min,S1}$	7,07	6,31	4,14	-	5,06	4,46	2,72	-	5,60	5,03	3,39	0,10
\overline{VL}_{S1}	-9,70	-9,00	-7,02	-3,05	-9,46	-8,88	-7,12	-3,62	-9,38	-8,84	-7,31	-4,24
$VL_{med,S1}$	-10,18	-9,54	-7,71	-3,40	-10,24	-9,71	-8,09	-2,75	-9,70	-9,20	-7,59	-4,48

$|VL| < 1,00$ $VL \geq 1,00$ $VL \leq -1,00$

Tabelle A.13: Optimierung E_{ver} , Übersicht VL, stationäre Beobachtung, R1- und R4-Deckschichten.

Stationäre Beobachtung, R1 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	6,31	5,55	3,37	-	5,05	4,39	2,51	-	4,62	3,92	1,92	-
\overline{VL}_{S0}	-8,04	-7,1	-5,20	-1,08	-7,21	-6,43	-4,19	0,00	-6,52	-5,76	-3,56	0,37
$VL_{med,S0}$	-7,87	-7,08	-4,82	-0,33	-7,21	-6,36	-3,96	0,45	-5,84	-5,02	-2,67	1,21
$ VL _{min,S1}$	7,38	6,73	4,88	1,16	6,11	5,57	4,03	0,44	5,93	5,35	3,69	0,18
\overline{VL}_{S1}	-9,51	-8,83	-6,86	-2,92	-8,95	-8,25	-6,27	-2,28	-8,36	-7,71	-5,91	-2,27
$VL_{med,S1}$	-9,49	-6,92	-6,85	-2,99	-9,15	-8,48	-6,58	-2,54	-8,21	-7,58	-5,79	-2,12

Stationäre Beobachtung, R4 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	3,49	2,42	-	-	2,81	1,79	-	0,74	2,97	1,98	-	-
\overline{VL}_{S0}	-5,57	-4,54	-1,65	2,76	-5,38	-4,35	-1,48	4,62	-5,27	-4,33	-1,68	2,31
$VL_{med,S0}$	-5,86	-4,82	-1,83	2,67	-5,78	-4,77	-1,91	2,54	-5,04	-4,03	-1,08	2,94
$ VL _{min,S1}$	6,86	6,01	3,60	-	5,19	4,29	2,51	-	5,72	5,19	3,66	0,61
\overline{VL}_{S1}	-10,21	-9,57	-7,69	-4,04	-10,52	-9,94	-8,44	-5,47	-10,80	-10,38	-9,18	-6,79
$VL_{med,S1}$	-10,58	-10,01	-8,31	-4,55	-11,51	-11,08	-9,75	-6,92	-11,45	-11,02	-9,77	-7,44

$|VL| < 1,00$ $VL \geq 1,00$ $VL \leq -1,00$

Tabelle A.14: Optimierung E_{ver} , Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, stationäre Beobachtung.

Stationäre Beobachtung, R2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	2,15	3,28	0,31	-	3,63	2,69	0,01	0,82	3,34	2,44	-	-
\overline{VL}_{S0}	-5,29	-5,28	-2,49	1,88	-5,57	-4,57	-1,72	2,61	-4,96	-4,01	-1,31	2,61
$VL_{med,S0}$	-5,60	-5,41	-2,60	1,90	-5,62	-4,61	-1,68	2,60	-4,32	-3,33	-0,51	3,28
$ VL _{min,S1}$	7,04	6,28	4,09	0,25	5,17	4,56	2,80	-	5,42	4,80	3,04	-
\overline{VL}_{S1}	-9,21	-8,44	-6,27	-1,97	-8,98	-8,29	-6,33	-2,43	-8,73	-8,14	-6,45	-3,10
$VL_{med,S1}$	-9,21	-8,47	-6,36	-2,07	-9,38	-8,76	-7,01	-3,09	-8,87	-8,31	-6,73	-3,36

Stationäre Beobachtung, R3 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	3,65	2,41	-	0,18	2,73	1,73	-	0,79	2,66	1,70	-	-
\overline{VL}_{S0}	-5,54	-4,48	-1,55	2,90	-5,23	-4,19	-1,28	3,03	-5,02	-4,06	-1,39	2,58
$VL_{med,S0}$	-5,85	-4,79	-1,82	2,67	-5,51	-4,48	-1,49	2,78	-4,78	-3,76	-0,92	3,31
$ VL _{min,S1}$	6,84	6,03	3,72	-	4,68	4,05	2,27	-	5,70	5,11	3,40	0,00
\overline{VL}_{S1}	-9,69	-8,99	-6,99	-2,98	-9,78	-9,17	-7,42	-3,97	-9,71	-9,19	-7,71	-4,77
$VL_{med,S1}$	-9,98	-9,35	-7,54	-3,20	-10,79	-10,27	-8,67	-5,05	-10,03	-9,57	-8,02	-5,17

$|VL| < 1,00$ ■ $VL \geq 1,00$ ■ $VL \leq -1,00$ ■

Tabelle A.15: Optimierung E_{ver} , Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, dynamische Beobachtung.

Dynamische Beobachtung, R2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	7,16	5,69	1,47	-	6,78	5,30	0,99	0,36	6,33	4,56	-	-
\overline{VL}_{S0}	-7,68	-6,46	-2,95	2,41	-7,15	-5,85	-2,11	3,21	-7,21	-5,74	-1,56	4,00
$VL_{med,S0}$	-7,64	-6,47	-3,03	2,57	-7,15	-5,77	-1,80	3,72	-7,13	-5,52	-0,90	4,96
$ VL _{min,S1}$	10,17	9,19	6,12	-	10,16	9,22	6,54	0,99	11,59	10,59	7,75	2,06
\overline{VL}_{S1}	-11,43	-10,49	-7,80	-2,39	-11,59	-10,76	-8,38	-3,61	-12,29	-11,42	-8,92	-3,93
$VL_{med,S1}$	-11,66	-10,73	-8,10	-2,73	-11,80	-10,96	-8,59	-3,87	-12,31	-11,40	-8,81	-3,64

Dynamische Beobachtung, R3 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	5,43	3,70	-	0,17	6,10	4,51	-	0,42	6,13	4,30	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,94	-5,58	-1,79	3,61	-6,90	-5,56	-1,68	3,59	-7,24	-5,77	-1,60	3,95
$VL_{med,S0}$	-7,20	-5,95	-2,29	3,43	-7,14	-5,73	-1,60	3,66	-7,06	-5,43	-0,73	5,17
$ VL _{min,S1}$	10,02	8,91	5,71	-	10,87	10,02	7,60	2,76	12,41	11,51	8,95	3,84
\overline{VL}_{S1}	-11,99	-11,11	-8,59	-3,60	-12,58	-11,87	-9,82	-5,71	-13,41	-12,65	-10,51	-6,22
$VL_{med,S1}$	-12,07	-11,23	-8,79	-4,01	-12,72	-11,99	-9,93	-5,81	-13,42	-12,65	-10,42	-5,98

$|VL| < 1,00$ ■ $VL \geq 1,00$ ■ $VL \leq -1,00$ ■

A.5.3 LEUCHTDICHTE

Tabelle A.16: Optimierung L, Übersicht Kennzahlen VL, stationäre Beobachtung, C-Deckschichten.

Stationäre Beobachtung, C1 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	4,57	3,29	-	-	4,49	4,18	2,53	-	4,96	4,59	1,40	-
\overline{VL}_{S0}	-6,95	-6,32	-4,51	-1,39	-6,36	-5,76	-4,07	-0,82	-6,06	-5,42	-3,64	-0,61
$VL_{med,S0}$	-6,50	-5,81	-3,83	-0,15	-5,96	-5,28	-3,57	0,02	-5,53	-4,95	-3,65	-0,34
$ VL _{min,S1}$	5,89	5,48	3,90	0,52	4,82	4,77	4,31	0,64	4,83	4,75	3,95	-
\overline{VL}_{S1}	-7,35	-6,93	-5,76	-3,39	-6,74	-6,31	-5,08	-2,63	-6,39	-5,96	-4,73	-2,28
$VL_{med,S1}$	-7,39	-6,93	-5,59	-3,48	-6,80	-6,21	-4,78	-2,21	-6,07	-5,65	-4,50	-2,64

Stationäre Beobachtung, C2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	3,70	2,02	-	-	5,10	3,77	-	-	4,34	3,03	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,39	-5,42	-2,73	1,52	-5,89	-4,94	-2,25	1,77	-5,35	-4,34	-1,53	2,51
$VL_{med,S0}$	-6,26	-5,16	-2,35	2,63	-5,68	-4,67	-1,77	3,03	-5,03	-3,83	-0,62	3,45
$ VL _{min,S1}$	6,16	5,81	3,78	-	5,13	5,08	3,62	-	5,01	4,81	3,71	-
\overline{VL}_{S1}	-6,97	-6,46	-5,00	-2,22	-6,56	-6,09	-4,76	-2,13	-6,28	-5,83	-4,57	-2,11
$VL_{med,S1}$	-6,66	-6,26	-4,84	-2,59	-6,48	-6,03	-4,89	-2,75	-6,35	-5,98	-4,56	-2,76

$|VL| < 1,00$ $VL \geq 1,00$ $VL \leq -1,00$

Tabelle A.17: Optimierung L, Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, stationäre Beobachtung, R1, R4.

Stationäre Beobachtung, R1 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	4,34	2,94	-	-	4,74	3,32	-	-	4,84	4,49	2,33	-
\overline{VL}_{S0}	-6,88	-6,26	-4,56	-2,08	-6,45	-5,87	-4,26	-1,37	-5,97	-5,37	-3,68	-0,68
$VL_{med,S0}$	-6,26	-5,84	-4,68	-2,48	-6,42	-5,81	-4,05	-1,45	-5,47	-4,88	-3,51	0,05
$ VL _{min,S1}$	5,33	5,05	2,94	-	5,02	4,95	3,18	-	5,03	4,81	3,47	-
\overline{VL}_{S1}	-7,28	-6,81	-5,48	-2,88	-6,74	-6,29	-5,00	-2,43	-6,25	-5,79	-4,49	-1,94
$VL_{med,S1}$	-7,45	-6,92	-5,41	-2,66	-6,76	-6,26	-4,80	-2,58	-5,95	-5,59	-4,48	-2,46

Stationäre Beobachtung, R4 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	5,00	4,01	0,62	-	5,03	3,41	-	-	4,39	3,54	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,38	-5,35	-2,41	1,99	-5,78	-4,77	-1,96	2,26	-5,39	-4,38	-1,57	2,55
$VL_{med,S0}$	-6,25	-5,11	-2,04	2,70	-5,64	-4,78	-2,11	2,05	-5,06	-4,14	-1,44	2,49
$ VL _{min,S1}$	6,21	5,92	3,35	-	5,12	5,09	2,99	-	5,00	4,88	2,98	-
\overline{VL}_{S1}	-7,00	-6,45	-4,90	-1,99	-6,50	-6,03	-4,71	-2,20	-6,17	-5,75	-4,54	-2,27
$VL_{med,S1}$	-6,83	-6,36	-5,22	-2,60	-6,38	-6,08	-5,00	-3,08	-6,32	-6,01	-4,80	-3,59

$|VL| < 1,00$ $VL \geq 1,00$ $VL \leq -1,00$

Tabelle A.18: Optimierung L, Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, stationäre Beobachtung.

Stationäre Beobachtung, R2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	4,22	2,79	-	-	4,75	3,66	-	-	4,63	3,70	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,64	-5,76	-3,29	0,74	-5,93	-5,03	-2,48	1,42	-5,52	-4,62	-2,06	1,73
$VL_{med,S0}$	-6,72	-5,65	-3,16	0,79	-5,73	-4,73	-2,28	2,02	-5,06	-4,10	-1,56	2,57
$ VL _{min,S1}$	6,18	5,78	3,93	-	5,18	5,13	3,64	-	4,86	4,62	3,46	-
\overline{VL}_{S1}	-7,06	-6,51	-4,96	-1,92	-6,53	-6,02	-4,56	-1,74	-6,22	-5,74	-4,35	-1,72
$VL_{med,S1}$	-6,83	-6,20	-4,60	-1,53	-6,38	-5,82	-4,65	-2,34	-6,14	-5,69	-4,34	-2,47

Stationäre Beobachtung, R3 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	4,99	4,04	0,61	-	4,82	3,59	-	-	4,62	3,01	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,38	-5,38	-2,48	1,87	-5,81	-4,82	-2,06	2,12	-5,44	-4,42	-1,59	2,58
$VL_{med,S0}$	-6,19	-5,08	-1,96	2,26	-5,54	-4,65	-1,97	2,14	-5,11	-4,18	-1,35	2,58
$ VL _{min,S1}$	6,03	5,95	3,39	-	5,09	5,06	2,77	-	4,79	4,62	2,85	-
\overline{VL}_{S1}	-6,99	-6,42	-4,82	-1,86	-6,51	-6,01	-4,57	-1,89	-6,16	-5,70	-4,38	-1,93
$VL_{med,S1}$	-6,85	-6,16	-4,96	-2,46	-6,55	-6,03	-4,94	-2,30	-6,44	-5,98	-4,53	-2,93

$|VL| < 1,00$ ■ $VL \geq 1,00$ ■ $VL \leq -1,00$ ■

Tabelle A.19: Optimierung L, Übersicht Kennzahlen Erkennbarkeit, dynamische Beobachtung.

Dynamische Beobachtung, R2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	6,75	4,71	-	-	6,52	4,77	-	-	7,08	5,13	0,26	-
\overline{VL}_{S0}	-8,25	-7,10	-3,88	1,20	-7,75	-6,64	-3,48	1,32	-8,18	-6,92	-3,32	1,88
$VL_{med,S0}$	-8,55	-7,49	-4,46	1,01	-7,69	-6,50	-3,05	2,24	-7,79	-6,34	-2,21	3,62
$ VL _{min,S1}$	8,17	7,23	4,37	-	7,91	6,99	4,14	-	8,00	6,81	3,41	-
\overline{VL}_{S1}	-8,82	-8,17	-6,27	-2,60	-8,52	-7,90	-6,11	-2,65	-9,06	-8,39	-6,47	-2,95
$VL_{med,S1}$	-8,85	-8,18	-6,17	-2,22	-8,47	-7,90	-6,29	-3,06	-9,06	-8,43	-6,60	-2,95

Dynamische Beobachtung, R3 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	7,50	5,61	0,20	-	6,11	4,12	-	-	6,56	4,24	-	-
\overline{VL}_{S0}	-8,06	-6,77	-3,07	2,39	-7,52	-6,31	-2,91	2,11	-8,07	-6,65	-2,82	2,90
$VL_{med,S0}$	-8,00	-6,80	-3,18	2,44	-7,70	-6,48	-3,01	2,35	-7,92	-6,45	-2,26	3,67
$ VL _{min,S1}$	7,83	6,71	3,42	-	7,63	6,53	3,10	-	7,66	6,32	2,49	-
\overline{VL}_{S1}	-8,70	-8,04	-6,12	-2,59	-8,54	-7,95	-6,26	-3,10	-9,07	-8,45	-6,70	-3,49
$VL_{med,S1}$	-8,69	-8,10	-6,32	-2,78	-8,69	-8,13	-6,53	-3,34	-9,23	-8,71	-7,23	-4,26

$|VL| < 1,00$ ■ $VL \geq 1,00$ ■ $VL \leq -1,00$ ■

A.5.4 VL-OPTIMIERUNG

Tabelle A.20: $|VL|_{min}$ -Werte und VL_{med} -Werte, stationäre und dynamische Beobachtung.

Stationäre Beobachtung, R2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	4,46	3,36	1,68	-	4,48	3,94	1,17	-	4,39	2,76	1,41	-
\overline{VL}_{S0}	-6,46	-5,55	-4,29	-0,67	-5,62	-5,21	-3,68	-0,11	-5,07	-4,16	-2,97	0,64
$VL_{med,S0}$	-6,25	-5,15	-4,04	-0,37	-5,55	-5,21	-3,93	-0,02	-4,86	-3,97	-2,40	0,77
$ VL _{min,S1}$	5,78	5,32	3,85	0,30	5,09	5,20	3,22	-	4,64	4,38	3,12	-
\overline{VL}_{S1}	-7,01	-6,33	-4,58	-1,58	-6,23	-5,92	-4,45	-1,29	-6,02	-5,67	-4,26	-1,33
$VL_{med,S1}$	-6,78	-6,03	-4,22	-0,84	-6,08	-5,91	-4,28	-1,01	-5,92	-5,75	-4,07	-1,92
Stationäre Beobachtung, R3 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	5,10	3,47	1,30	-	4,79	2,62	1,46	-	3,83	1,19	0,40	-
\overline{VL}_{S0}	-6,04	-4,95	-2,76	1,63	-5,51	-4,43	-2,48	1,77	-4,93	-3,79	-2,12	1,65
$VL_{med,S0}$	-5,86	-4,83	-2,20	1,57	-5,39	-4,47	-1,83	2,36	-4,88	-4,39	-1,73	1,63
$ VL _{min,S1}$	5,72	5,81	2,95	1,48	5,29	5,15	1,78	-	4,79	4,66	2,58	-
\overline{VL}_{S1}	-6,69	-6,32	-4,53	-1,60	-6,39	-5,85	-4,13	-1,51	-6,19	-5,70	-4,24	-1,76
$VL_{med,S1}$	-6,38	-6,11	-4,82	-1,86	-6,36	-5,84	-4,71	-1,41	-6,44	-5,78	-4,50	-2,44
Dynamische Beobachtung, R2 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	7,14	4,31	3,59	-	5,94	4,14	-	-	5,59	3,17	0,89	-
\overline{VL}_{S0}	-8,19	-6,88	-5,79	-1,09	-7,39	-6,87	-5,38	-0,82	-7,72	-6,48	-4,68	0,27
$VL_{med,S0}$	-8,33	-7,04	-5,60	-1,38	-7,85	-6,79	-6,77	-1,05	-7,82	-6,74	-5,43	-0,29
$ \Delta VL_{min,max} _{S0}$	2,16	4,24	5,62	9,77	2,83	4,36	8,63	10,79	4,20	6,65	9,01	18,56
$ VL _{min,S1}$	8,49	7,13	4,32	0,45	7,57	6,82	3,20	-	8,12	7,16	4,11	-
\overline{VL}_{S1}	-8,83	-7,96	-5,73	-2,07	-8,19	-7,96	-6,16	-2,13	-8,85	-8,36	-6,31	-2,40
$VL_{med,S1}$	-8,73	-8,01	-5,45	-1,21	-8,08	-7,90	-6,86	-1,74	-8,69	-8,21	-6,07	-2,94
$ \Delta VL_{min,max} _{S1}$	1,14	1,14	3,44	7,59	1,40	2,56	4,82	8,42	1,63	2,60	4,53	11,12
Dynamische Beobachtung, R3 Fahrbahndeckschicht												
S_{rel}	1/3				1/4				1/5			
ρ_0 [%]	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40	6,5	10	20	40
$ VL _{min,S0}$	6,68	4,43	1,81	-	5,05	2,52	1,12	-	4,61	0,75	1,08	-
\overline{VL}_{S0}	-7,65	-6,21	-3,51	1,92	-7,21	-5,88	-3,64	1,57	-7,56	-5,96	-3,29	1,48
$VL_{med,S0}$	-7,67	-5,96	-3,23	1,85	-7,59	-6,44	-3,58	1,94	-7,48	-5,96	-2,34	2,00
$ \Delta VL_{min,max} _{S0}$	2,10	3,61	5,45	6,22	3,73	5,61	5,85	9,67	5,35	9,15	7,36	17,15
$ VL _{min,S1}$	-7,55	6,41	3,01	-	7,33	6,07	2,50	-	7,92	6,87	6,78	-
\overline{VL}_{S1}	-8,53	-7,80	-5,75	-2,20	-8,51	-7,87	-5,74	-2,45	-9,04	-8,41	-6,50	-3,08
$VL_{med,S1}$	-8,63	-7,97	-6,01	-2,69	-8,53	-7,85	-5,82	-2,07	-9,22	-8,62	-6,99	-3,49
$ \Delta VL_{min,max} _{S1}$	1,75	2,47	5,29	9,30	2,22	3,20	5,78	9,63	2,12	3,25	3,25	11,99

$|VL| < 1,00$ $VL \geq 1,00$ $VL \leq -1,00$

Tabelle A.21: Einfluss des Mastabstandes auf die Ergebnisse der VL-Optimierung.

R2-Fahrbahndeckschicht, stationäre Beobachtung												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	4,46	4,48	4,39	3,36	3,94	2,76	1,68	1,17	1,41	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,46	-5,62	-5,07	-5,55	-5,21	-4,16	-4,29	-3,68	-2,97	-0,67	-0,11	0,64
$VL_{med,S0}$	-6,25	-5,55	-4,86	-5,15	-5,21	-3,97	-4,04	-3,93	-2,40	-0,37	-0,02	0,77
$ VL _{min,S1}$	5,78	5,09	4,64	5,32	5,20	4,38	3,85	3,22	3,12	0,30	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,01	-6,23	-6,02	-6,33	-5,92	-5,67	-4,58	-4,45	-4,26	-1,58	-1,29	-1,33
$VL_{med,S1}$	-6,78	-6,08	-5,92	-6,03	-5,91	-5,75	-4,32	-4,28	-4,07	-0,84	-1,01	-1,92
R3-Fahrbahndeckschicht, stationäre Beobachtung												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	5,10	4,79	3,83	3,47	2,62	1,19	1,30	1,46	0,40	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,04	-5,51	-4,93	-4,95	-4,43	-3,79	-2,76	-2,48	-2,12	1,63	1,77	1,65
$VL_{med,S0}$	-5,86	-5,39	-4,88	-4,83	-4,47	-4,39	-2,20	-1,83	-1,73	1,57	2,36	1,63
$ VL _{min,S1}$	5,72	5,29	4,79	5,81	5,15	4,66	2,95	1,78	2,58	1,48	-	-
\overline{VL}_{S1}	-6,69	-6,39	-6,19	-6,32	-5,85	-5,70	-4,53	-4,13	-4,24	-1,60	-1,51	-1,76
$VL_{med,S1}$	-6,38	-6,36	-6,44	-6,11	-5,84	-5,78	-4,82	-4,71	-4,50	-1,86	-1,41	-2,44
R2-Fahrbahndeckschicht, dynamische Beobachtung												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	7,14	5,94	5,59	4,31	4,14	3,17	3,59	-	0,89	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-8,19	-7,39	-7,72	-6,88	-6,87	-6,48	-5,79	-5,38	-4,68	-1,09	-0,82	0,27
$VL_{med,S0}$	-8,33	-7,85	-7,82	-7,04	-6,79	-6,74	-5,60	-6,77	-5,43	-1,38	-1,05	-0,29
$ VL _{min,S1}$	8,49	7,57	8,12	7,13	6,82	7,16	4,32	3,20	4,11	0,45	-	-
\overline{VL}_{S1}	-8,83	-8,19	-8,85	-7,96	-7,96	-8,36	-5,73	-6,16	-6,31	-2,07	-2,13	-2,40
$VL_{med,S1}$	-8,73	-8,08	-8,69	-8,01	-7,90	-8,21	-5,45	-6,86	-6,07	-1,21	-1,74	-2,94
R3-Fahrbahndeckschicht, dynamische Beobachtung												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	6,68	5,05	4,61	4,43	2,52	0,75	1,81	1,12	1,08	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-7,65	-7,21	-7,56	-6,21	-5,88	-5,96	-3,51	-3,64	-3,29	1,92	1,57	1,48
$VL_{med,S0}$	-7,67	-7,59	-7,48	-5,96	-6,44	-5,96	-3,23	-3,58	-2,34	1,85	1,94	2,00
$ VL _{min,S1}$	7,55	7,33	7,92	6,41	6,07	6,87	3,01	2,50	2,34	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-8,53	-8,51	-9,04	-7,80	-7,87	-8,41	-5,75	-5,74	-6,50	-2,20	-2,45	-3,08
$VL_{med,S1}$	-8,63	-8,53	-9,22	-7,97	-7,85	-8,62	-6,01	-5,82	-6,99	-2,69	-2,07	-3,49

$|VL| < 1,00$ ■ $VL \geq 1,00$ ■ $VL \leq -1,00$ ■

A.6 ÜBERSICHT STVL-WERTE

Tabelle A.22: Vergleich STVL-Werte, stationäre Beobachtung, Fahrspur 0.

Fahrspur 0												
E_h	18m				24m				30m			
STV-Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
C1	8,98	8,16	5,19	5,91	8,52	7,29	5,12	6,46	8,45	6,84	5,44	7,30
C2	5,37	4,36	5,29	7,10	4,96	5,03	5,89	8,03	5,50	5,45	6,50	7,68
R1	8,66	7,74	5,16	6,14	8,28	6,93	5,40	6,64	8,60	6,75	5,87	7,18
R2	6,10	4,63	4,95	6,89	5,56	4,74	5,79	8,05	5,53	5,35	6,61	7,71
R3	4,46	4,24	5,15	7,23	4,66	4,95	5,9	8,31	5,29	5,73	6,85	7,26
R4	4,13	4,17	5,35	7,25	4,81	4,99	6,13	8,41	5,24	5,8	7,06	7,25
E_v	18m				24m				30m			
STV-Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
C1	9,55	8,61	5,88	1,33	8,89	7,83	4,77	1,25	8,59	7,42	4,04	1,95
C2	6,82	5,50	1,70	2,92	6,74	5,27	1,27	3,75	6,49	4,97	1,14	4,45
R1	9,77	8,83	6,11	1,38	9,32	8,27	5,23	1,25	8,87	7,74	4,48	1,64
R2	7,58	6,33	2,63	2,34	7,24	5,87	1,91	3,17	6,78	5,34	1,28	4,09
R3	6,66	5,26	1,90	3,10	6,67	5,21	1,7	3,59	6,74	5,25	1,68	4,04
R4	6,65	5,26	1,92	2,93	6,85	5,41	1,9	3,39	7,09	5,64	1,87	3,87
L	18m				24m				30m			
STV-Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
C1	8,26	7,26	4,27	2,66	8,27	7,46	5,06	1,45	8,39	7,46	4,63	2,84
C2	7,56	6,13	2,97	3,29	7,69	6,35	2,57	3,58	7,35	5,83	1,98	4,08
R1	7,99	6,8	3,59	5,86	8,35	7,44	4,85	2,99	8,3	7,44	4,85	2,49
R2	7,9	6,62	3,45	2,83	7,74	6,5	2,79	2,98	7,64	6,31	2,39	3,43
R3	7,76	6,5	2,69	2,86	7,6	6,22	2,62	3,19	7,55	6,02	2,49	3,37
R4	7,78	6,48	2,63	3,08	7,57	6,15	2,6	3,04	7,48	6,04	2,19	3,57
VL	18m				24m				30m			
STV-Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	7,78	6,55	4,9	2,01	7,34	6,69	4,65	2,12	7,05	5,59	3,76	3,15
R3	7,41	5,96	3,07	1,81	7,2	5,64	2,99	2,39	6,8	4,87	2,45	3,07

STV < 2,7 STV < 3,2 STV < 3,8 STV ≥ 3,8

Tabelle A.23: Vergleich STVL-Werte, stationäre Beobachtung, Fahrspur 1.

Fahrspur 1												
E_h	18m				24m				30m			
STVL-Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
C1	9,25	8,36	5,41	6,22	9,1	7,78	5,77	7,14	9,64	7,9	6,66	8,43
C2	5,42	4,85	6,06	7,72	5,67	6,28	6,73	7,86	7,29	7,13	8,07	8,8
R1	8,58	7,59	4,89	6,34	8,35	6,94	5,83	6,82	9,06	7,21	6,53	8,41
R2	6,1	4,99	5,83	7,38	5,93	5,89	6,45	8	7,05	6,8	7,49	8,96
R3	4,83	4,93	6,06	7,92	5,74	6,5	6,9	8,14	7,81	7,2	8,66	9,22
R4	4,76	5,08	6,33	8,05	6,08	6,85	7,05	8	7,46	7,08	8,73	8,99
E_v	18m				24m				30m			
STVL-Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
C1	12,14	11,31	8,93	4,18	11,79	10,92	8,42	3,37	11,54	10,67	8,14	3,01
C2	11,49	10,61	8,06	3	11,57	10,8	8,36	3,87	12,42	11,63	9,32	4,52
R1	11,38	10,54	8,12	3,3	11,4	10,49	7,88	2,56	11,26	10,35	7,74	2,35
R2	11	10,03	7,3	2,01	11,26	10,33	7,64	2,73	11,59	10,72	8,18	3,24
R3	11,43	10,52	7,89	2,93	11,91	11,04	8,52	4,27	12,72	11,94	9,65	4,86
R4	11,88	11,02	8,46	3,82	12,62	11,64	9,3	5,23	13,78	13,1	11,1	6,85
L	18m				24m				30m			
STVL-Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
C1	9	8,47	6,96	3,76	8,82	8,27	6,63	3,1	8,9	8,3	6,52	2,79
C2	8,59	7,96	6,02	2,78	8,65	8,03	6,2	2,86	8,79	8,19	6,39	3,04
R1	8,84	8,22	6,41	3,1	8,84	8,25	6,47	3,03	8,72	8,08	6,16	2,65
R2	8,7	8,01	5,97	2,18	8,6	7,93	5,93	2,51	8,7	8,03	6,02	2,86
R3	8,63	7,91	5,76	2,84	8,59	7,93	5,89	3,04	8,61	7,99	6,06	3,13
R4	8,65	7,95	5,84	2,97	8,58	7,97	6,07	3,2	8,67	8,08	6,26	3,57
V_L	18m				24m				30m			
STVL-Werte	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%	6,50%	10%	20%	40%
R2	8,62	7,79	5,6	1,58	8,22	7,78	5,76	1,87	8,42	7,93	5,91	2,68
R3	8,27	7,8	5,41	2,44	8,42	7,69	5,24	2,69	8,67	8,01	5,86	3,12

STVL < 2,7 STVL < 3,2 STVL < 3,8 STVL ≥ 3,8

A.7 ÜBERSICHT EINFLUSS MASTABSTAND

Tabelle A.24: Übersicht Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, E_{hor} .

R1-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	4,86	3,90	3,15	3,28	1,96	0,83	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-7,21	-6,72	-6,70	-6,72	-6,13	-6,00	-5,34	-4,64	-4,53	-3,25	-2,25	-1,58
$VL_{med,S0}$	-7,32	-7,28	-6,54	-7,13	-6,87	-6,53	-6,55	-6,35	-6,17	-6,46	-6,03	-6,11
$ VL _{min,S1}$	4,75	3,64	3,05	3,12	1,81	0,82	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,24	-7,02	-7,24	-6,72	-6,44	-6,60	-5,32	-5,00	-5,04	-3,23	-2,61	-2,43
$VL_{med,S1}$	-7,57	-7,75	-7,22	-7,23	-7,37	-7,22	-6,87	-6,97	-7,12	-6,82	-6,97	-6,94
R2-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	2,15	1,06	0,01	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-5,29	-4,99	-4,91	-4,60	-4,26	-4,14	-3,07	-2,57	-2,29	-0,47	0,45	1,17
$VL_{med,S0}$	-5,60	-5,58	-5,46	-5,38	-5,23	-5,45	-5,38	-5,23	-5,25	-4,64	-4,67	-4,68
$ VL _{min,S1}$	1,18	0,47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-5,82	-6,07	-6,51	-5,14	-5,06	-5,94	-3,65	-3,81	-4,28	-0,90	-0,89	-1,24
$VL_{med,S1}$	-6,47	-6,64	-6,94	-6,06	-6,02	-6,91	-6,17	-6,35	-6,91	-5,77	-6,35	-6,20
R3-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-4,32	-4,26	-4,33	-3,61	-3,52	-3,53	-1,96	-1,61	-1,45	1,10	1,90	2,50
$VL_{med,S0}$	-5,06	-5,04	-5,16	-5,06	-5,03	-5,15	-4,97	-5,03	-4,76	-3,92	-4,57	-3,70
$ VL _{min,S1}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-5,01	-5,75	-6,85	-4,32	-5,10	-6,15	-2,62	-3,28	-4,48	0,47	0,03	-1,33
$VL_{med,S1}$	-5,17	-6,53	-7,54	-5,16	-6,10	-7,52	-5,14	-5,50	-7,53	-5,10	-5,50	-7,14
R4-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-3,98	-4,11	-4,28	-3,28	-3,32	-3,47	-1,50	-1,34	-1,30	1,81	2,37	2,76
$VL_{med,S0}$	-4,76	-5,01	-5,24	-4,75	-5,01	-5,24	-4,70	5,01	-4,68	-3,61	-4,45	-3,74
$ VL _{min,S1}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-4,88	-5,85	-7,08	-4,20	-5,18	-6,31	-2,44	-3,33	-4,63	0,86	0,03	-1,39
$VL_{med,S1}$	-5,13	-6,89	-7,90	-5,12	-6,46	-7,89	-5,07	-5,47	-7,89	-4,98	-5,47	-7,87

Tabelle A.25: Übersicht Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, E_{ver} .

R1-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	6,31	5,05	4,62	5,55	4,39	3,92	3,37	2,51	1,92	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-8,04	-7,21	-6,52	-7,1	-6,43	-5,76	-5,20	-4,19	-3,56	-1,08	0,00	0,37
$VL_{med,S0}$	-7,87	-7,21	-5,84	-7,08	-6,36	-5,02	-4,82	-3,96	-2,67	-0,33	0,45	1,21
$ VL _{min,S1}$	7,38	6,11	5,93	6,73	5,57	5,35	4,88	4,03	3,69	1,16	0,44	0,18
\overline{VL}_{S1}	-9,51	-8,95	-8,36	-8,83	-8,25	-7,71	-6,86	-6,27	-5,91	-2,92	-2,28	-2,27
$VL_{med,S1}$	-9,49	-9,15	-8,21	-6,92	-8,48	-7,58	-6,85	-6,58	-5,79	-2,99	-2,54	-2,12
R2-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	2,15	3,63	3,34	3,28	2,69	2,44	0,31	0,01	-	-	0,82	-
\overline{VL}_{S0}	-5,29	-5,57	-4,96	-5,28	-4,57	-4,01	-2,49	-1,72	-1,31	1,88	2,61	2,61
$VL_{med,S0}$	-5,60	-5,62	-4,32	-5,41	-4,61	-3,33	-2,60	-1,68	-0,51	1,90	2,60	3,28
$ VL _{min,S1}$	7,04	5,17	5,42	6,28	4,56	4,80	4,09	2,80	3,04	0,25	-	-
\overline{VL}_{S1}	-9,21	-8,98	-8,73	-8,44	-8,29	-8,14	-6,27	-6,33	-6,45	-1,97	-2,43	-3,10
$VL_{med,S1}$	-9,21	-9,38	-8,87	-8,47	-8,76	-8,31	-6,36	-7,01	-6,73	-2,07	-3,09	-3,36
R3-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	3,65	2,73	2,66	2,41	1,73	1,70	-	-	-	0,18	0,79	-
\overline{VL}_{S0}	-5,54	-5,23	-5,02	-4,48	-4,19	-4,06	-1,55	-1,28	-1,39	2,90	3,03	2,58
$VL_{med,S0}$	-5,85	-5,51	-4,78	-4,79	-4,48	-3,76	-1,82	-1,49	-0,92	2,67	2,78	3,31
$ VL _{min,S1}$	6,84	4,68	5,70	6,03	4,05	5,11	3,72	2,27	3,40	-	-	0,00
\overline{VL}_{S1}	-9,69	-9,78	-9,71	-8,99	-9,17	-9,19	-6,99	-7,42	-7,71	-2,98	-3,97	-4,77
$VL_{med,S1}$	-9,98	-	-	-9,35	-	-9,57	-7,54	-8,67	-8,02	-3,20	-5,05	-5,17
		10,79	10,03		10,27							
R4-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	3,49	2,81	2,97	2,42	1,79	1,98	-	-	-	-	0,74	-
\overline{VL}_{S0}	-5,57	-5,38	-5,27	-4,54	-4,35	-4,33	-1,65	-1,48	-1,68	2,76	4,62	2,31
$VL_{med,S0}$	-5,86	-5,78	-5,04	-4,82	-4,77	-4,03	-1,83	-1,91	-1,08	2,67	2,54	2,94
$ VL _{min,S1}$	6,86	5,19	5,72	6,01	4,29	5,19	3,60	2,51	3,66	-	-	0,61
\overline{VL}_{S1}	-10,21	-10,52	-10,80	-9,57	-9,94	-10,38	-7,69	-8,44	-9,18	-4,04	-5,47	-6,79
$VL_{med,S1}$	-10,58	-11,51	-11,45	-10,01	-11,08	-11,02	-8,31	-9,75	-9,77	-4,55	-6,92	-7,44

Tabelle A.26: Übersicht Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, L.

R1-Fahrbahnedeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	4,34	4,74	4,84	2,94	3,32	4,49	-	-	2,33	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,88	-6,45	-5,97	-6,26	-5,87	-5,37	-4,56	-4,26	-3,68	-2,08	-1,37	-0,68
$VL_{med,S0}$	-6,26	-6,42	-5,47	-5,84	-5,81	-4,88	-4,68	-4,05	-3,51	-2,48	-1,45	0,05
$ VL _{min,S1}$	5,33	5,02	5,03	5,05	4,95	4,81	2,94	3,18	3,47	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,28	-6,74	-6,25	-6,81	-6,29	-5,79	-5,48	-5,00	-4,49	-2,88	-2,43	-1,94
$VL_{med,S1}$	-7,45	-6,76	-5,95	-6,92	-6,26	-5,59	-5,41	-4,80	-4,48	-2,66	-2,58	-2,46
R2-Fahrbahnedeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	4,22	4,75	4,63	2,79	3,66	3,70	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,64	-5,93	-5,52	-5,76	-5,03	-4,62	-3,29	-2,48	-2,06	0,74	1,42	1,73
$VL_{med,S0}$	-6,72	-5,73	-5,06	-5,65	-4,73	-4,10	-3,16	-2,28	-1,56	0,79	2,02	2,57
$ VL _{min,S1}$	6,18	5,18	4,86	5,78	5,13	4,62	3,93	3,64	3,46	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,06	-6,53	-6,22	-6,51	-6,02	-5,74	-4,96	-4,56	-4,35	-1,92	-1,74	-1,72
$VL_{med,S1}$	-6,83	-6,38	-6,14	-6,20	-5,82	-5,69	-4,60	-4,65	-4,34	-1,53	-2,34	-2,47
R3-Fahrbahnedeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	4,99	4,82	4,62	4,04	3,59	3,01	0,61	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,38	-5,81	-5,44	-5,38	-4,82	-4,42	-2,48	-2,06	-1,59	1,87	2,12	2,58
$VL_{med,S0}$	-6,19	-5,54	-5,11	-5,08	-4,65	-4,18	-1,96	-1,97	-1,35	2,26	2,14	2,58
$ VL _{min,S1}$	6,03	5,09	4,79	5,95	5,06	4,62	3,39	2,77	2,85	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-6,99	-6,51	-6,16	-6,42	-6,01	-5,70	-4,82	-4,57	-4,38	-1,86	-1,89	-1,93
$VL_{med,S1}$	-6,85	-6,55	-6,44	-6,16	-6,03	-5,98	-4,96	-4,94	-4,53	-2,46	-2,30	-2,93
R4-Fahrbahnedeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	5,00	5,03	4,39	4,01	3,41	3,54	0,62	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,38	-5,78	-5,39	-5,35	-4,77	-4,38	-2,41	-1,96	-1,57	1,99	2,26	2,55
$VL_{med,S0}$	-6,25	-5,64	-5,06	-5,11	-4,78	-4,14	-2,04	-2,11	-1,44	2,70	2,05	2,49
$ VL _{min,S1}$	6,21	5,12	5,00	5,92	5,09	4,88	3,35	2,99	2,98	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,00	-6,50	-6,17	-6,45	-6,03	-5,75	-4,90	-4,71	-4,54	-1,99	-2,20	-2,27
$VL_{med,S1}$	-6,83	-6,38	-6,32	-6,36	-6,08	-6,01	-5,22	-5,00	-4,80	-2,60	-3,08	-3,59

Tabelle A.27: Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, VL stationär.

R2-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	4,46	4,48	4,39	3,36	3,94	2,76	1,68	1,17	1,41	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,46	-5,62	-5,07	-5,55	-5,21	-4,16	-4,29	-3,68	-2,97	-0,67	-0,11	0,64
$VL_{med,S0}$	-6,25	-5,55	-4,86	-5,15	-5,21	-3,97	-4,04	-3,93	-2,40	-0,37	-0,02	0,77
$ VL _{min,S1}$	5,78	5,09	4,64	5,32	5,20	4,38	3,85	3,22	3,12	0,30	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,01	-6,23	-6,02	-6,33	-5,92	-5,67	-4,58	-4,45	-4,26	-1,58	-1,29	-1,33
$VL_{med,S1}$	-6,78	-6,08	-5,92	-6,03	-5,91	-5,75	-4,22	-4,28	-4,07	-0,84	-1,01	-1,92
R3-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	5,10	4,79	3,83	3,47	2,62	1,19	1,30	1,46	0,40	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,04	-5,51	-4,93	-4,95	-4,43	-3,79	-2,76	-2,48	-2,12	1,63	1,77	1,65
$VL_{med,S0}$	-5,86	-5,39	-4,88	-4,83	-4,47	-4,39	-2,20	-1,83	-1,73	1,57	2,36	1,63
$ VL _{min,S1}$	5,72	5,29	4,79	5,81	5,15	4,66	2,95	1,78	2,58	1,48	-	-
\overline{VL}_{S1}	-6,69	-6,39	-6,19	-6,32	-5,85	-5,70	-4,53	-4,13	-4,24	-1,60	-1,51	-1,76
$VL_{med,S1}$	-6,38	-6,36	-6,44	-6,11	-5,84	-5,78	-4,82	-4,71	-4,50	-1,86	-1,41	-2,44

Tabelle A.28: Mastabstand Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, E_{hor} dynamisch.

R2-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	2,9	1,38	1,36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-6,91	-6,69	-7,56	-6,07	-5,18	-6,53	-4,29	-3,91	-4,19	-1,23	-0,40	-0,06
$VL_{med,S0}$	-8,02	-8,46	-8,69	-7,84	-8,28	-8,44	-7,34	-7,75	-7,75	-6,33	-6,57	-6,35
$ VL _{min,S1}$	1,75	1,52	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-7,47	-7,95	-9,58	-6,68	-7,16	-8,69	-4,96	-5,34	-6,65	-1,87	-2,06	-3,09
$VL_{med,S1}$	-8,54	-9,08	-10,02	-8,40	-9,03	-9,84	-8,00	-8,83	-8,68	-7,19	-8,04	-6,46
R3-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	0,22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-5,74	-5,63	-6,60	-4,92	-4,77	-5,57	-3,01	-2,64	-3,00	0,49	1,36	1,63
$VL_{med,S0}$	-7,27	-7,44	-7,58	-7,09	-7,41	-6,91	-6,56	-6,78	-6,00	-5,51	-5,53	-4,22
$ VL _{min,S1}$	-	-	2,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-6,75	-7,67	-9,72	-5,92	-6,92	-8,89	-4,05	-4,98	-6,84	-0,48	-1,43	-3,15
$VL_{med,S1}$	-7,87	-9,06	-10,65	-7,75	-8,68	-10,03	-7,30	-8,50	-8,94	-6,45	-8,35	-6,64

Tabelle A.29: Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, E_{ver} dynamisch.

R2-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	7,16	6,78	6,33	5,69	5,30	4,56	1,47	0,99	-	-	0,36	-
\overline{VL}_{S0}	-7,68	-7,15	-7,21	-6,46	-5,85	-5,74	-2,95	-2,11	-1,56	2,41	3,21	4,00
$VL_{med,S0}$	-7,64	-7,15	-7,13	-6,47	-5,77	-5,52	-3,03	-1,80	-0,90	2,57	3,72	4,96
$ VL _{min,S1}$	10,17	10,16	11,59	9,19	9,22	10,59	6,12	6,54	7,75	-	0,99	2,06
\overline{VL}_{S1}	-11,43	-11,59	-12,29	-10,49	-10,76	-11,42	-7,80	-8,38	-8,92	-2,39	-3,61	-3,93
$VL_{med,S1}$	-11,66	-11,80	-12,31	-10,73	-10,96	-11,40	-8,10	-8,59	-8,81	-2,73	-3,87	-3,64
R3-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	5,43	6,10	6,13	3,70	4,51	4,30	-	-	-	0,17	0,42	-
\overline{VL}_{S0}	-6,94	-6,90	-7,24	-5,58	-5,56	-5,77	-1,79	-1,68	-1,60	3,61	3,59	3,95
$VL_{med,S0}$	-7,20	-7,14	-7,06	-5,95	-5,73	-5,43	-2,29	-1,60	-0,73	3,43	3,66	5,17
$ VL _{min,S1}$	10,02	10,87	12,41	8,91	10,02	11,51	5,71	7,60	8,95	-	2,76	3,84
\overline{VL}_{S1}	-11,99	-12,58	-13,41	-11,11	-11,87	-12,65	-8,59	-9,82	-10,51	-3,60	-5,71	-6,22
$VL_{med,S1}$	-12,07	-12,72	-13,42	-11,23	-11,99	-12,65	-8,79	-9,93	-10,42	-4,01	-5,81	-5,98

Tabelle A.30: Einfluss des Mastabstandes auf die Optimierung auf Gleichmäßigkeiten, L dynamisch.

R2-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	6,75	6,52	7,08	4,71	4,77	5,13	-	-	0,26	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-8,25	-7,75	-8,18	-7,10	-6,64	-6,92	-3,88	-3,48	-3,32	1,20	1,32	1,88
$VL_{med,S0}$	-8,55	-7,69	-7,79	-7,49	-6,50	-6,34	-4,46	-3,05	-2,21	1,01	2,24	3,62
$ VL _{min,S1}$	8,17	7,91	8,00	7,23	6,99	6,81	4,37	4,14	3,41	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-8,82	-8,52	-9,06	-8,17	-7,90	-8,39	-6,27	-6,11	-6,47	-2,60	-2,65	-2,95
$VL_{med,S1}$	-8,85	-8,47	-9,06	-8,18	-7,90	-8,43	-6,17	-6,29	-6,60	-2,22	-3,06	-2,95
R3-Fahrbahndeckschicht												
$\rho_{Sehobjekt}$ [%]	6,5			10			20			40		
h/d -ratio	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/5
$ VL _{min,S0}$	7,50	6,11	6,56	5,61	4,12	4,24	0,20	-	-	-	-	-
\overline{VL}_{S0}	-8,06	-7,52	-8,07	-6,77	-6,31	-6,65	-3,07	-2,91	-2,82	2,39	2,11	2,90
$VL_{med,S0}$	-8,00	-7,70	-7,92	-6,80	-6,48	-6,45	-3,18	-3,01	-2,26	2,44	2,35	3,67
$ VL _{min,S1}$	7,83	7,63	7,66	6,71	6,53	6,32	3,42	3,10	2,49	-	-	-
\overline{VL}_{S1}	-8,70	-8,54	-9,07	-8,04	-7,95	-8,45	-6,12	-6,26	-6,70	-2,59	-3,10	-3,49
$VL_{med,S1}$	-8,69	-8,69	-9,23	-8,10	-8,13	-8,71	-6,32	-6,53	-7,23	-2,78	-3,34	-4,26

A.8 ERGÄNZUNG LICHTSTROMBEDARF

Tabelle A.31: Beispiele im Verlauf vergleichbarer VL Verläufe. Betrachtung zum Erzielen eines mittleren VL nötigen mittleren horizontalen Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten [Lu 2014, S. 80 f.].

Situation	Optimierung	$\bar{V}L$	\bar{E}_{hor}	\bar{L} in $[cd/m^2]$
R2, 18 m, $\rho_o = 6,5\%$, Fahrspur 1	L	-7,06	12,7	0,79
	VL	-7,01	12,52	0,77
R2, 18 m, $\rho_o = 6,5\%$, Fahrspur 0	L	-6,64	12,7	0,79
	VL	-6,46	12,52	0,77
R3, 18 m, $\rho_o = 10\%$, Fahrspur 1	L	-6,42	16,4	0,77
	VL	-6,32	16,4	0,77
R2, 24 m, $\rho_o = 6,5\%$, Fahrspur 0	E_{ver}	-5,57	10,7	1,17
	VL	-5,62	12,03	0,77
R2, 24 m, $\rho_o = 10\%$, Fahrspur 1	L	-6,02	11,7	0,77
	VL	-5,92	11,8	0,75
R3, 24 m, $\rho_o = 6,5\%$, Fahrspur 1	L	-6,51	14	0,76
	VL	-6,39	15,72	0,82
R2, 30 m, $\rho_o = 20\%$, Fahrspur 1	E_{hor}	-4,28	10,27	0,78
	L	-4,35	10,3	0,76
	VL	-4,26	11,4	0,79
R2, 30 m, $\rho_o = 10\%$, Fahrspur 0	E_{hor}	-4,14	10,26	0,78
	VL	-4,16	12,03	0,84
R3, 30 m, $\rho_o = 6,5\%$, Fahrspur 0	E_{ver}	-4,93	8,7	1,39
	VL	-5,02	13,92	0,82
R2, 30 m, $\rho_o = 10\%$, Fahrspur 1	L	-5,74	10,3	0,76
	VL	-5,67	12,03	0,84
R3, 30 m, $\rho_o = 6,5\%$, Fahrspur 1	L	-6,16	12,1	0,75
	VL	-6,19	13,92	0,82
R3, 30 m, $\rho_o = 10\%$, Fahrspur 1	L	-5,70	12,1	0,75
	VL	-5,70	14,8	0,84

A.9 ANHÄNGE ZUM LABORVERSUCH

A.9.1 EINFLUSS STREULICHT

Tabelle A.32: Einfluss des reflektierten Streulichtes auf die horizontale Beleuchtungsstärke unter simulierten Reflexionsgraden von $\rho_{Wand} = 0\%, 5\%, 10\%$.

S_{rel}	ρ_{Wand}	Horizontale Beleuchtungsstärke E_{hor}				
		\bar{E}	E_{min}	E_{max}	$U_{o, Ehor}$	$U_{1, Ehor}$
1/3	10 %	47 lx	34 lx	87 lx	0,73	0,39
	5 %	47 lx	34 lx	87 lx	0,73	0,39
	0 %	47 lx	34 lx	87 lx	0,73	0,39
1/4	10 %	94 lx	77 lx	125 lx	0,82	0,61
	5 %	94 lx	77 lx	125 lx	0,82	0,61
	0 %	94 lx	76 lx	125 lx	0,82	0,61
1/5	10 %	41 lx	30 lx	56 lx	0,72	0,53
	5 %	41 lx	30 lx	56 lx	0,72	0,53
	0 %	41 lx	30 lx	56 lx	0,72	0,53

A.9.2 REFLEXIONSTABELLE UND KENNWERTE LABORTEPPICH

Tabelle A.33: R-Tabelle Laborteppich, Beobachtungswinkel 1° , aufgeführt $R \cdot 10^4$, Teil I [SCHULZE 2014].

γ	β									
	0°	2°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
0,0	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9
14,0	74,7	100,6	99,7	99,8	96,5	97,8	98,4	97,0	95,4	90,7
26,6	87,5	128,9	125,9	122,6	119,7	120,2	106,4	102,1	91,7	89,1
36,9	104,3	154,0	145,9	146,6	132,1	122,2	105,8	98,7	86,9	75,2
45,0	125,9	186,7	166,4	162,7	133,0	115,3	96,0	79,2	69,0	61,3
51,3	146,1	184,5	168,5	154,5	119,9	100,7	84,8	74,8	60,6	53,3
56,3	152,5	179,0	168,7	140,8	110,4	89,8	74,7	61,8	49,5	41,9
60,3	156,4	180,5	160,4	130,0	100,5	82,5	63,6	50,5	38,9	33,5
63,4	151,5	175,4	148,1	119,1	91,8	71,9	53,2	42,1	32,7	27,1
68,2	123,7	150,3	120,3	94,9	68,4	49,7	37,8	31,6	23,4	19,9
71,6	116,1	129,0	104,2	74,3	48,2	36,9	27,7	21,9	19,1	14,8
74,1	108,2	114,8	88,3	57,1	37,1	26,5	21,7	18,2	14,2	10,3
76,0	100,5	102,7	75,5	43,7	30,0	20,5	17,1	13,3	10,8	8,2
77,5	93,2	89,1	63,3	35,1	22,9	17,4	13,2	10,1	8,4	7,0
78,7	86,9	77,5	55,6	29,7	18,2	13,9	10,3	8,2	7,0	5,4
79,7	80,6	69,5	47,0	24,2	15,6	11,3	8,3	6,4	6,1	4,6
80,5	75,2	63,7	40,3	20,8	13,2	9,0	6,6	5,4	5,2	-
81,3	71,4	58,1	34,5	17,6	11,2	7,4	5,5	4,6	-	-
81,9	65,5	53,4	30,4	14,7	9,5	6,2	4,8	3,9	-	-
82,4	58,8	48,9	26,6	12,5	8,1	5,4	4,3	-	-	-
82,9	55,0	45,5	23,4	10,9	7,0	4,8	3,8	-	-	-
83,3	52,5	41,6	20,7	9,8	6,1	4,2	3,3	-	-	-
83,7	50,6	39,5	18,5	8,8	5,4	3,8	-	-	-	-
84,0	48,9	37,7	16,7	7,8	4,8	3,4	-	-	-	-
84,3	47,8	34,8	15,5	7,0	4,3	3,0	-	-	-	-
84,6	47,3	33,4	14,6	6,4	3,9	2,7	-	-	-	-
84,8	45,5	32,0	13,2	5,7	3,4	2,5	-	-	-	-
85,0	44,1	30,4	12,3	5,2	3,1	-	-	-	-	-
85,2	43,3	27,8	11,5	5,2	2,8	-	-	-	-	-

Tabelle A.34: Laborteppich, Beobachtungswinkel 1° [SCHULZE 2014].

q_0	S1	S2	κ_p
0,042	1,920	5,261	0,721

Tabelle A.35: R-Tabelle Laborteppich, Beobachtungswinkel 1° , aufgeführt $R \cdot 10^4$, Teil 2 [SCHULZE 2014].

γ	β									
	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
0,0	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9	78,9
14,0	87,1	81,9	76,5	70,8	65,9	62,6	61,5	58,0	58,4	58,0
26,6	84,3	69,7	61,5	56,0	52,9	50,5	46,2	45,3	46,1	42,4
36,9	68,4	54,3	47,3	42,3	40,7	37,6	36,6	34,2	34,1	33,5
45,0	54,6	41,0	33,2	28,6	28,9	28,5	27,2	25,6	25,7	24,6
51,3	44,7	29,9	23,3	21,7	21,6	20,8	19,9	20,3	19,9	19,2
56,3	34,7	23,7	17,5	16,2	16,8	15,8	15,5	15,4	14,7	15,6
60,3	28,7	18,1	13,9	12,5	12,7	11,9	12,0	11,6	11,5	12,6
63,4	22,3	14,3	10,8	9,9	10,2	9,7	10,2	9,5	9,7	10,3
68,2	16,0	9,7	7,1	6,4	6,4	6,3	6,9	6,6	6,7	6,7
71,6	11,3	6,6	5,4	4,9	4,6	4,6	5,0	4,7	5,0	5,0
74,1	8,3	5,1	3,9	3,6	3,4	3,4	3,7	3,6	3,5	3,8
76,0	6,4	3,8	3,0	2,7	2,5	2,5	2,9	2,8	2,8	2,9
77,5	5,1	3,0	2,4	2,1	2,0	2,0	2,3	2,3	2,3	2,3
78,7	4,1	2,4	1,9	1,6	1,6	1,6	1,8	1,9	1,9	1,9

Tabelle A.36: R-Tabelle Laborteppich, Beobachtungswinkel 3° , aufgeführt $R \cdot 10^4$, Teil I [SCHULZE 2014].

γ	β									
	0°	2°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
0,0	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9
14,0	84,2	117,4	114,2	115,3	115,0	115,3	116,0	114,7	111,1	103,4
26,6	101,0	141,4	140,0	136,6	133,5	129,7	119,4	112,4	102,1	91,7
36,9	115,2	162,0	161,6	155,7	127,3	120,8	103,8	96,7	82,8	74,5
45,0	128,8	183,3	169,7	159,9	129,2	109,4	99,2	78,2	65,3	52,4
51,3	150,2	175,1	170,8	149,8	113,6	97,8	81,1	64,9	51,2	44,4
56,3	142,4	168,3	157,1	134,0	96,3	81,5	66,8	51,8	40,5	33,7
60,3	141,3	156,4	138,4	117,0	87,2	70,8	50,9	41,5	32,8	24,9
63,4	129,3	141,0	121,0	105,7	73,9	56,2	41,6	31,7	25,6	20,2
68,2	106,4	117,9	97,2	75,7	56,2	37,0	28,9	20,6	18,2	14,9
71,6	92,1	97,6	78,7	55,4	39,3	27,0	19,1	15,6	13,0	12,2
74,1	83,9	79,6	65,0	42,1	27,9	19,5	13,3	12,4	10,9	8,5
76,0	69,5	70,0	51,8	33,7	21,8	14,2	10,8	9,9	8,0	5,9
77,5	62,8	60,6	42,6	27,6	16,8	10,7	9,2	7,1	5,9	4,4
78,7	55,3	52,3	35,1	22,0	12,3	9,1	7,2	5,8	4,4	3,6
79,7	49,5	44,3	28,9	18,6	9,7	8,3	5,7	4,5	3,6	3,0
80,5	44,5	38,7	25,8	15,4	8,2	6,7	4,7	3,7	2,9	-
81,3	40,7	33,1	21,9	12,7	6,9	5,6	4,0	2,9	-	-
81,9	41,8	29,4	19,0	10,8	6,1	4,7	3,4	2,5	-	-
82,4	37,7	25,9	16,6	9,1	5,5	3,9	2,8	-	-	-
82,9	35,3	23,1	14,4	7,7	5,1	3,2	2,4	-	-	-
83,3	30,9	20,3	12,8	6,6	4,5	2,7	2,1	-	-	-
83,7	26,4	18,5	11,5	5,5	3,9	2,2	-	-	-	-
84,0	22,5	17,3	10,1	4,6	3,4	1,9	-	-	-	-
84,3	20,5	15,7	9,2	4,1	3,0	1,7	-	-	-	-
84,6	19,1	14,7	8,6	3,7	2,7	1,5	-	-	-	-
84,8	17,4	13,7	7,7	3,4	2,4	1,4	-	-	-	-
85,0	16,3	12,7	7,1	3,1	2,1	-	-	-	-	-
85,2	15,4	11,4	6,5	3,1	1,9	-	-	-	-	-

Tabelle A.37: R-Tabelle Laborteppich, Beobachtungswinkel 3°, aufgeführt R·10⁴, Teil 2 [SCHULZE 2014].

γ	β									
	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
0,0	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9	88,9
14,0	104,1	94,0	89,0	81,6	78,5	74,6	69,9	66,7	62,9	64,1
26,6	88,7	79,4	69,8	61,7	59,0	55,9	47,4	50,0	49,8	48,8
36,9	66,4	54,3	51,5	45,2	43,0	40,9	40,1	37,0	35,0	34,5
45,0	51,0	37,4	33,7	30,8	31,2	31,0	29,2	27,1	27,2	26,9
51,3	37,8	27,1	23,3	21,7	22,0	21,8	21,4	22,0	19,9	18,6
56,3	27,7	21,2	18,1	16,8	18,5	16,9	15,9	16,3	15,7	14,7
60,3	21,1	16,8	12,9	14,3	14,0	13,4	12,6	12,3	11,8	12,6
63,4	17,2	12,9	10,4	9,9	11,3	10,4	11,3	9,5	9,7	9,0
68,2	12,4	8,3	6,6	6,5	6,6	6,8	7,4	6,9	6,7	6,7
71,6	10,2	5,0	4,6	4,3	4,4	4,7	4,9	5,1	4,6	4,6
74,1	6,2	3,7	3,3	3,3	3,1	3,6	3,5	3,7	3,3	3,5
76,0	4,6	2,9	2,5	2,4	2,3	2,8	2,6	2,7	2,6	2,6
77,5	3,6	2,2	1,8	2,0	1,8	2,2	2,0	2,2	2,3	2,3
78,7	2,7	1,8	1,5	1,5	1,5	1,7	1,6	1,8	1,7	1,9

Tabelle A.38: Laborteppich, Beobachtungswinkel 3° [SCHULZE 2014].

q_0	S1	S2	κ_p
0,032	1,454	3,581	0,554

A.9.3 LABORLEUCHTE UND STEUERUNG

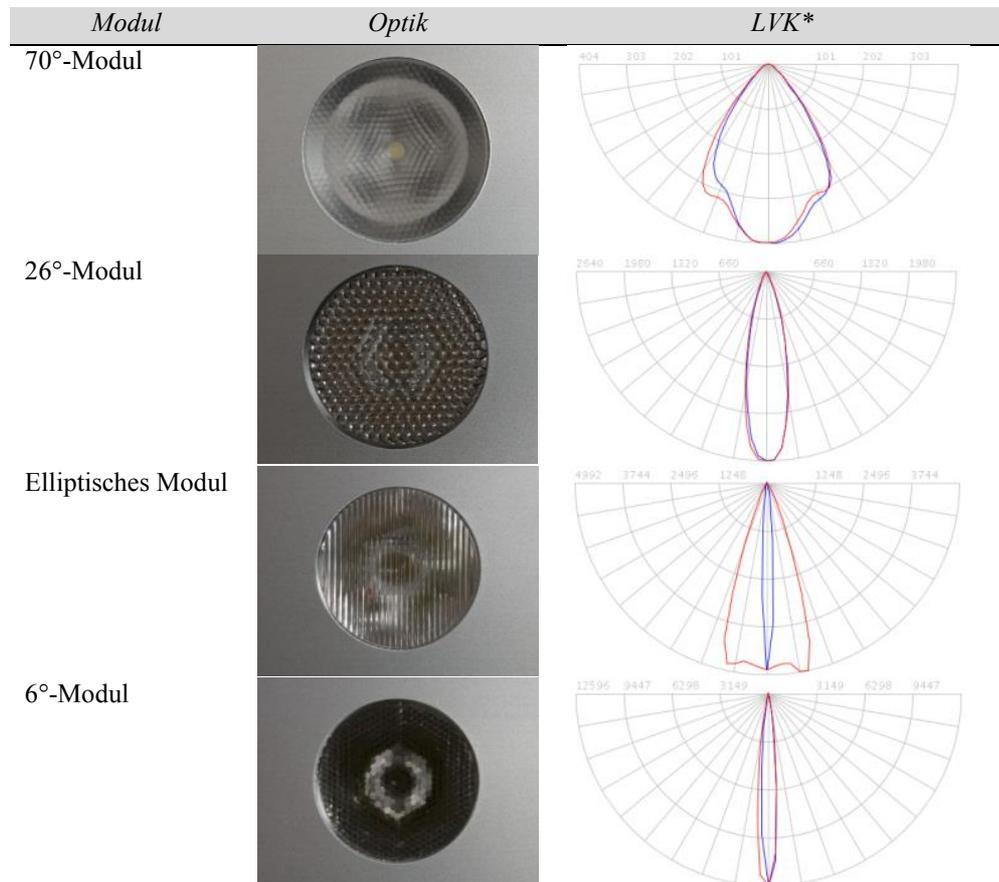


Abbildung A.3: Übersicht der LED-Module, die im Rahmen der Nachstellung zum Einsatz kommen, C0-C180-Ebene (blau), C90-C270-Ebene (rot).

Tabelle A.39: Konfiguration der LED-Leuchte im Laborversuch.

Modul	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
VL_6_opt_3h_3	-	26°	26°	26°	26°	26°	26°	26°	-	26°	26°	26°	26°	26°	26°	-
	-	-65°	-50°	-40°	-30°	-20°	-10°	0°	-	10°	20°	30°	40°	50°	65°	-
	-	-50%	-80%	-40%	-80%	-10%	-50%	-40%	-	-50%	-10%	-80%	-40%	-80%	-50%	-
VL_6_opt_4h_3	Ellipt.	Ellipt.	26°	26°	26°	26°	26°	-	-	26°	26°	26°	26°	26°	Ellipt.	Ellipt.
	-65°	-50°	-60°	-40°	-30°	-20°	-5°	-	-	5°	20°	30°	40°	60°	50°	65°
	-70%	-70%	0%	-20%	-70%	-30%	-60%	-	-	-60%	-30%	-70%	-20%	0%	-70%	-70%
VL_6_opt_5h_1	Ellipt.	-	26°	26°	26°	26°	26°	26°	26°	26°	26°	26°	26°	26°	-	Ellipt.
	-65°	-	-60°	-50°	-40°	-35°	-20°	-5°	5°	20°	35°	40°	50°	60°	-	65°
	-70%	-	-10%	-70%	-70%	-70%	-30%	-50%	-50%	-30%	-70%	-70%	-70%	-10%	-	-70%
VL_40_opt_3h_2	Ellipt.	-	-	26°	26°	-	26°	-	Ellipt.	26°	-	26°	26°	-	-	Ellipt.
	-70°	-	-	-55°	-30°	-	-10°	-	0°	10°	-	30°	55°	-	-	70°
	-50%	-	-	-60%	-40%	-	-30%	-	-70%	-30%	-	-40%	-60%	-	-	-50%
VL_40_opt_4h_1	Ellipt.	-	26°	-	26°	26°	26°	26°	Ellipt.	26°	26°	26°	-	26°	-	Ellipt.
	-75°	-	-65°	-	-40°	-25°	-10°	0°	0°	10°	25°	40°	-	65°	-	75°
	-40%	-	-50%	-	-70%	-60%	-50%	-80%	-80%	-50%	-60%	-70%	-	-50%	-	-40%
VL_20_opt_3h_6	Ellipt.	Ellipt.	-	-	26°	Ellipt.	26°	26°	-	26°	Ellipt.	26°	-	-	Ellipt.	Ellipt.
	-65°	-60°	-	-	-30°	-5°	0°	0°	-	0°	5°	30°	-	-	60°	65°
	0%	-30%	-	-	-30%	-40%	0%	0%	-	0%	-40%	-30%	-	-	-30%	0%
VL_20_opt_4h_2	Ellipt.	-	26°	-	26°	Ellipt.	-	26°	Ellipt.	26°	Ellipt.	26°	-	26°	-	Ellipt.
	-70°	-	-60°	-	-30°	-5°	-	0°	0°	0°	5°	30°	-	60°	-	70°
	0%	-	0%	-	-50%	-50%	-	0%	0%	0%	-50%	-50%	-	0%	-	0%
VL_20_opt_5h_3	Ellipt.	-	26°	-	26°	Ellipt.	-	26°	Ellipt.	26°	Ellipt.	26°	-	26°	-	Ellipt.
	-70°	-	-60°	-	-30°	-5°	-	0°	0°	0°	5°	30°	-	60°	-	70°
	0%	-	-20%	-	-50%	-50%	-	0%	0%	0%	-50%	-50%	-	-20%	-	0%

A.9.4 LEUCHTEKONFIGURATOR

The image shows a software interface for configuring lighting. It is divided into five numbered sections:

- 1.** A top view diagram showing the arrangement of 14 modules in two rows of seven. Each module is represented by a vertical rectangle containing three circles. A blue vertical bar is on the right side.
- 2.** A beam spread diagram below the module arrangement. It shows a semi-circular grid with radial lines. Two curves are plotted: a blue curve representing the C0-C180 level and a red curve representing the C90-C270 level. The horizontal axis is labeled with values: 411, 308, 205, 103, 103, 205, 308.
- 3.** A table listing modules and their beam angles.
- 4.** A box displaying the total light output and power consumption.
- 5.** A configuration panel for adding modules and adjusting settings.

Modul	Winkel
Caralux ellipt 01 2012_08_01-02	-75°
Caralux ellipt 01 2012_08_01-02	-15°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	-20°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	-25°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	-40°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	-50°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	-65°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	-70°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	70°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	65°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	50°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	40°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	25°
Caralux 26 Grad 01 2012_08_01-03	20°
Caralux ellipt 01 2012_08_01-02	15°
Caralux ellipt 01 2012_08_01-02	75°

Lichtstrom: 8.800 Lumen
Leistung: 115 Watt

LED-Modul einfügen: Caralux 70 Grad 01 2012_07_31-4

-80 -75 -70 -65 -60 -55 -50 -45 -40 -35 -30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 ° Anstellwinkel

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 % Dimmung

Hinzufügen

Abbildung A.4: Leuchtenkonfigurator mit Angaben zur Anordnung der Module (1.), der Form der LVK mit Darstellung der C-Ebenen in C0-C180-Ebene (blau) und C90-C270-Ebene (rot) (2.), Modulstückliste (3.). Anschlussleistung und Lichtstrom der Konfiguration (4.). Konfigurationspanel (5).

A.9.5 ÜBERSICHT REALISIERTE LVK LABORVERSUCH

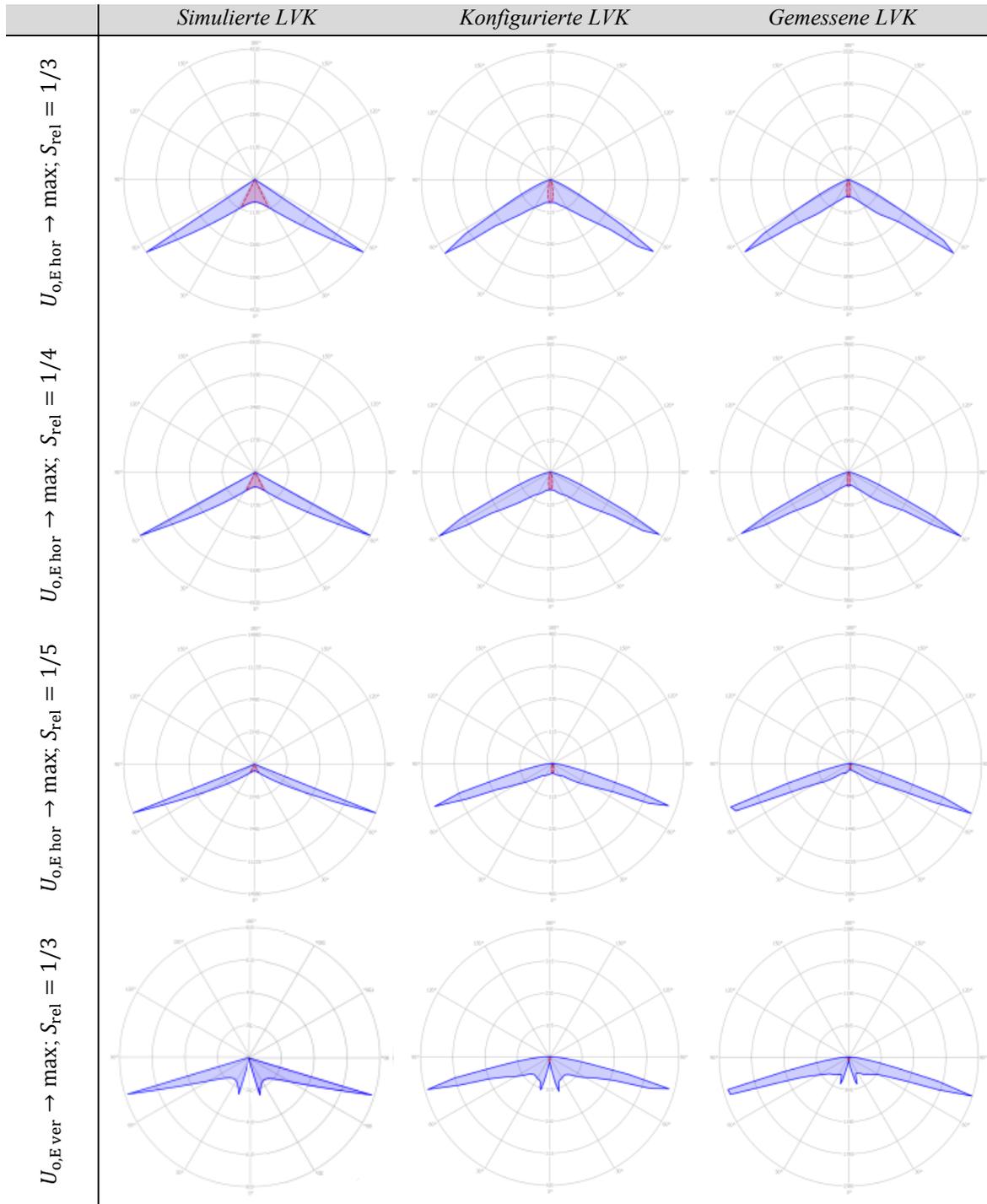


Abbildung A.5: Gegenüberstellung der LVK E_{hor} , E_{ver} , L , Teil 1, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30°-Schritten, relative Darstellung.

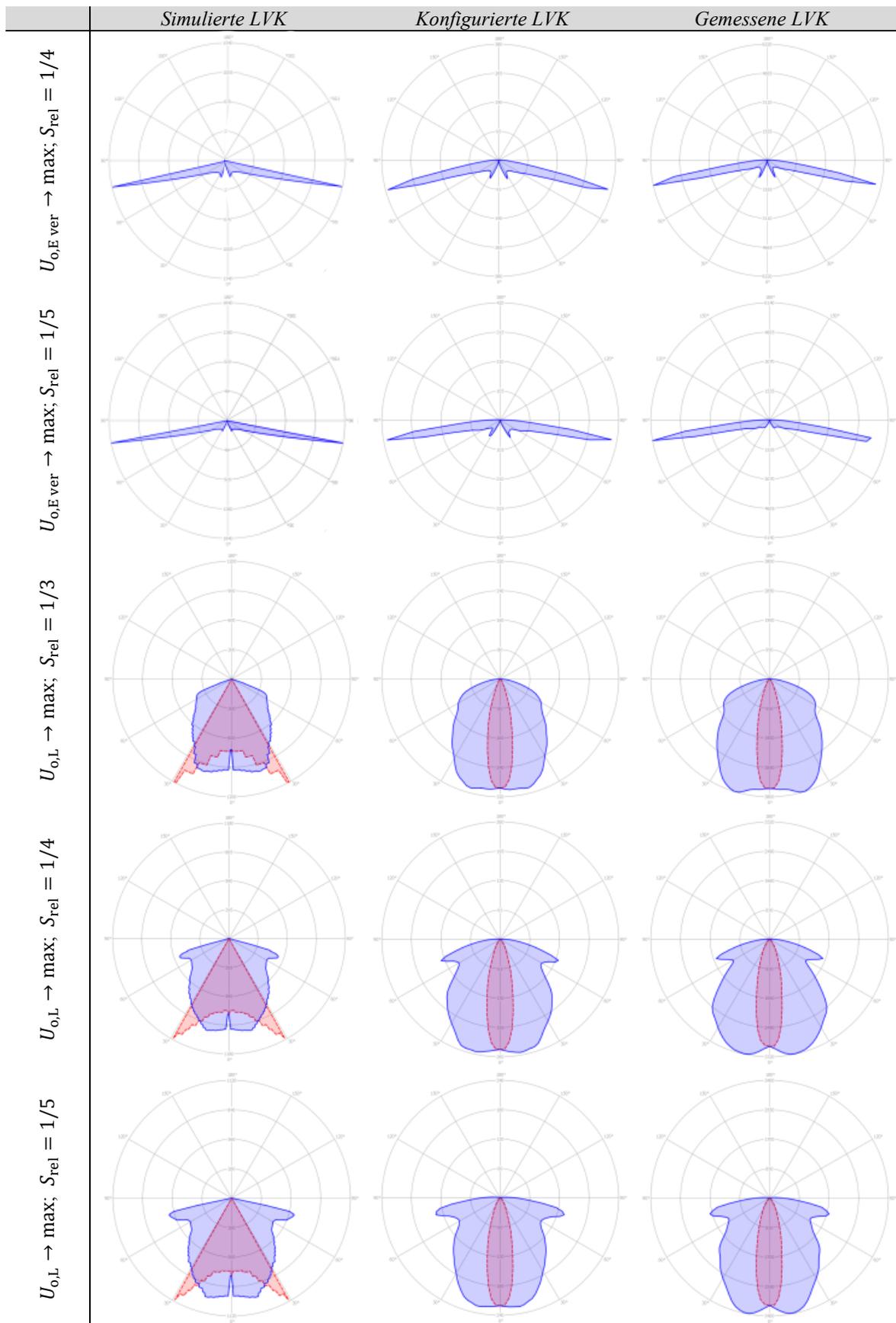


Abbildung A.6: Gegenüberstellung der LVK E_{hor} , E_{ver} , L , Teil 2, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30°-Schritten, relative Darstellung.

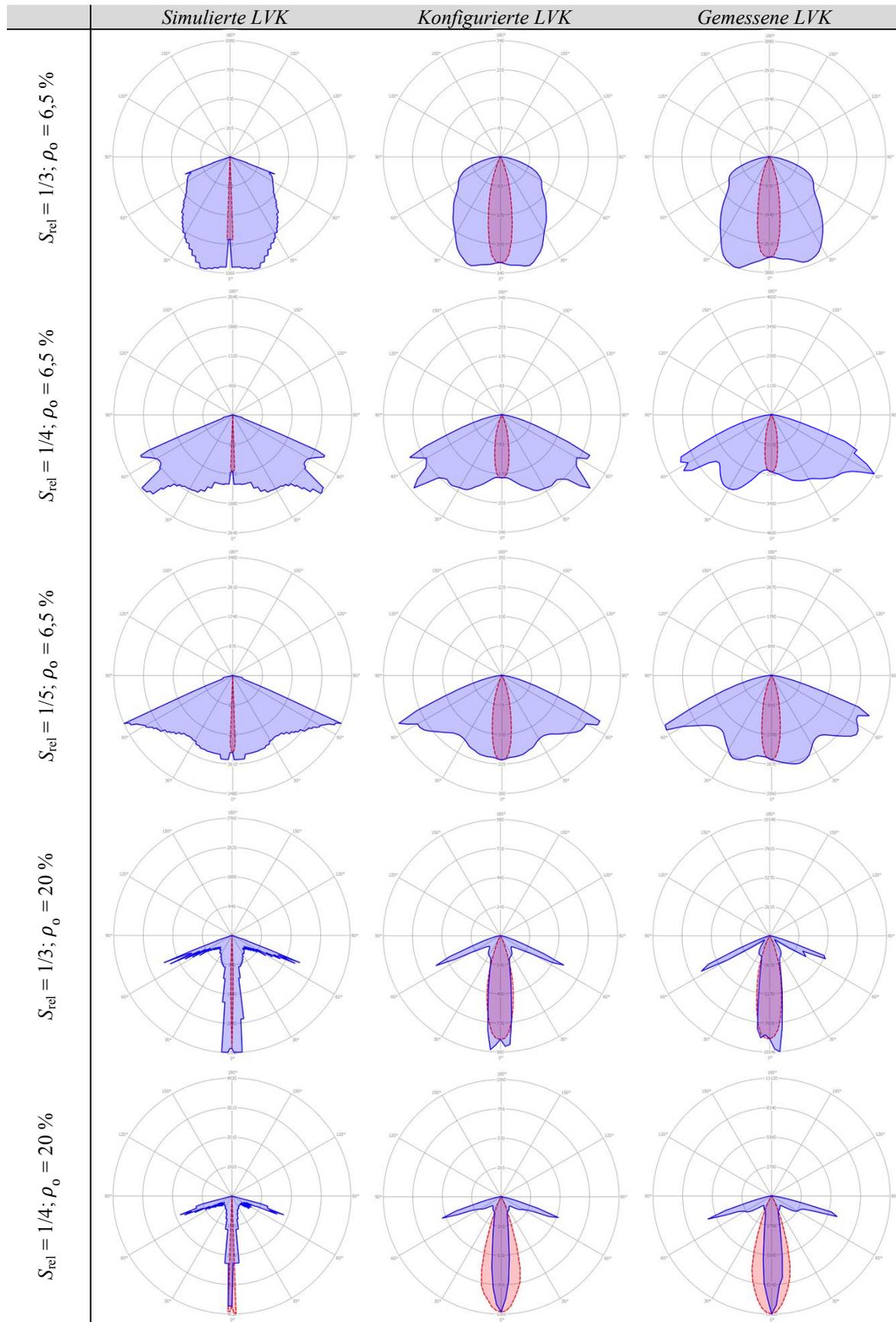


Abbildung A.7: Gegenüberstellung der LVK E_{hor} , E_{ver} , L , Teil 3, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30° -Schritten, relative Darstellung.

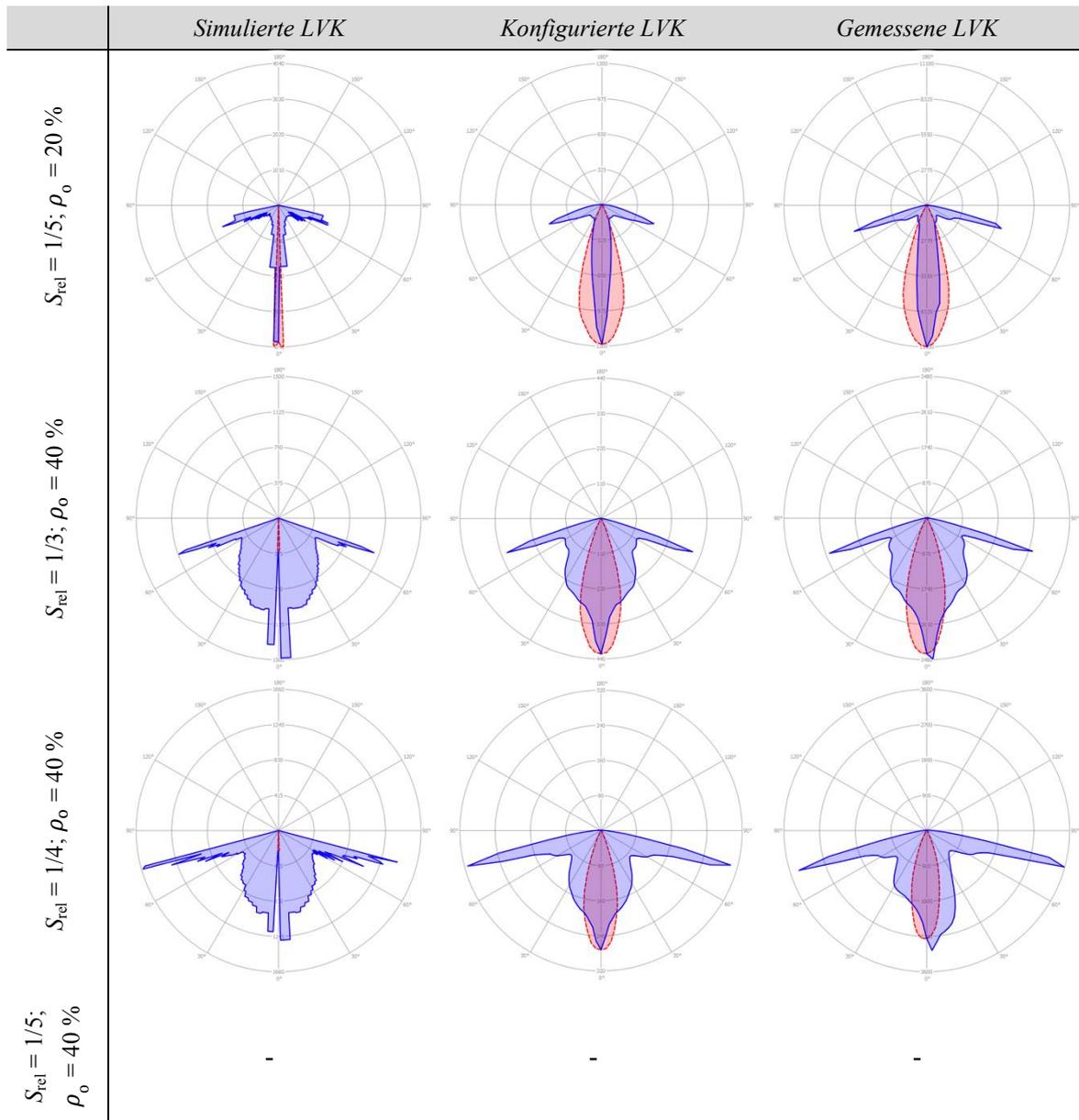


Abbildung A.8: Gegenüberstellung der LVK E_{hor} , E_{ver} , L , Teil 4, blauer Volumenschnitt C0-C180-Ebene, roter Schnitt C90-C270-Ebene, γ in 30°-Schritten, relative Darstellung.

A.9.6 ÜBERSICHT VERGLEICHE ERKENNBARKEITEN SIMULATION UND MESSUNG

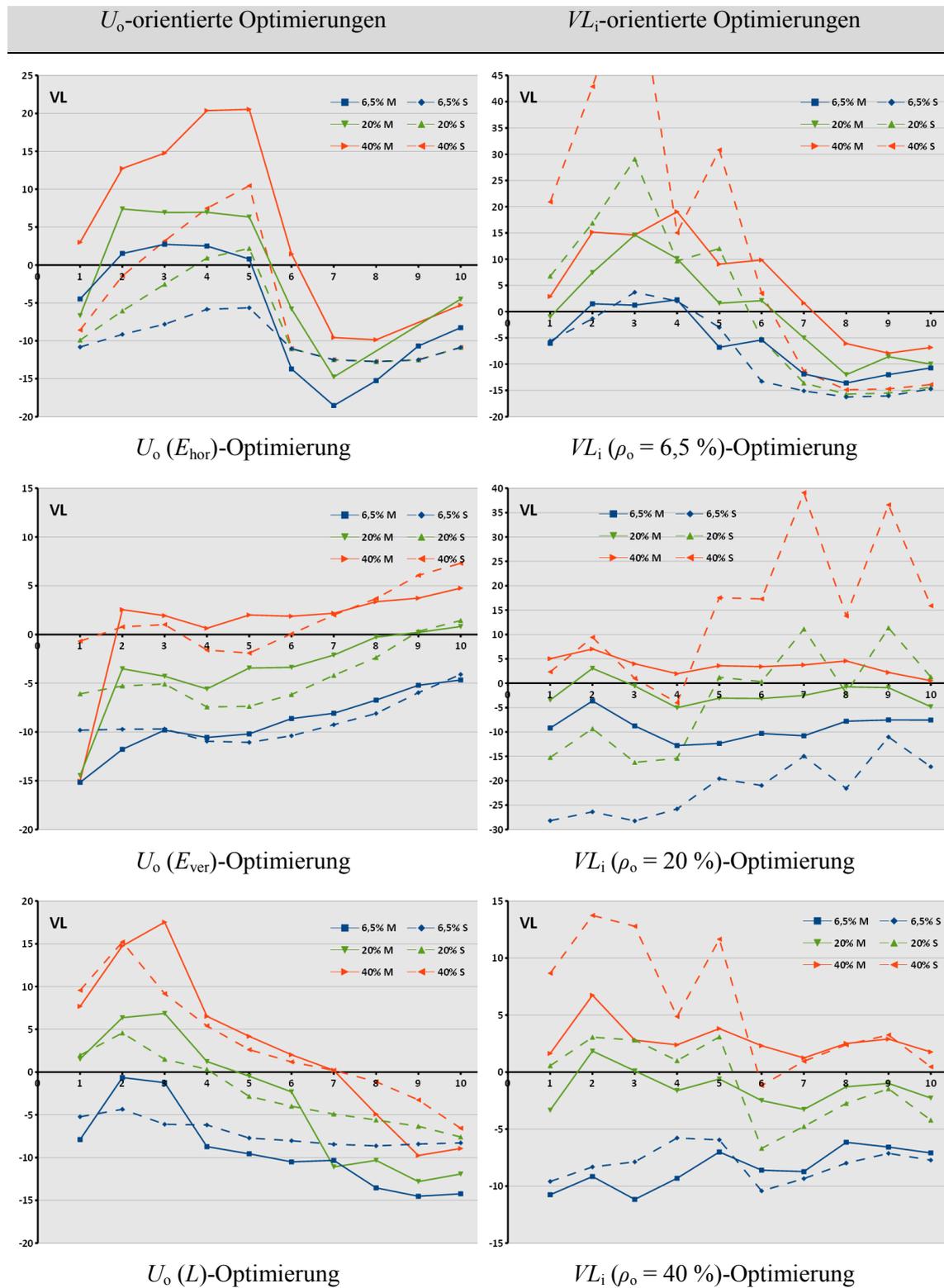
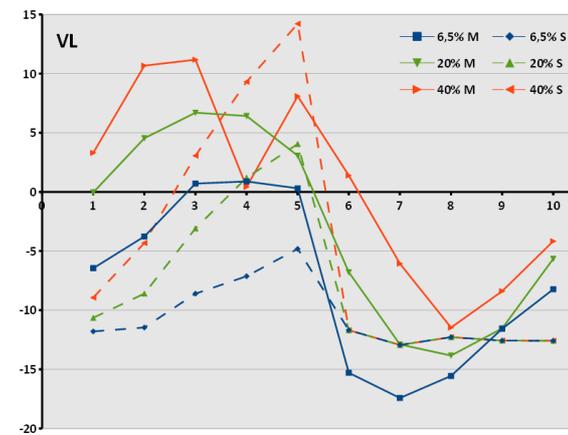


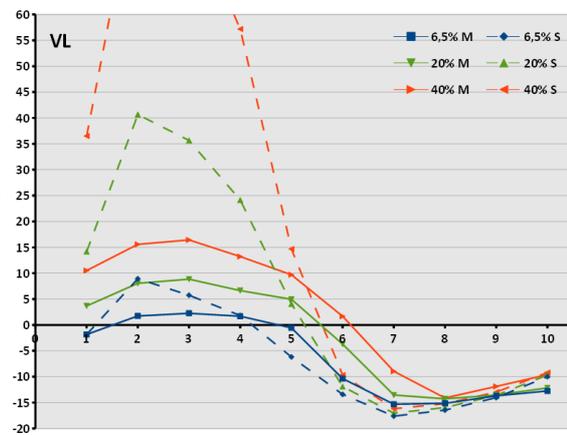
Abbildung A.9: Vergleich von Mess- (M) und Simulationsergebnissen (S) für den Mastabstand der vierfachen Lichtpunkthöhe $S_{rel} = 1/4$ [FRAUENHOFER 2015].

U_o -orientierte Optimierungen

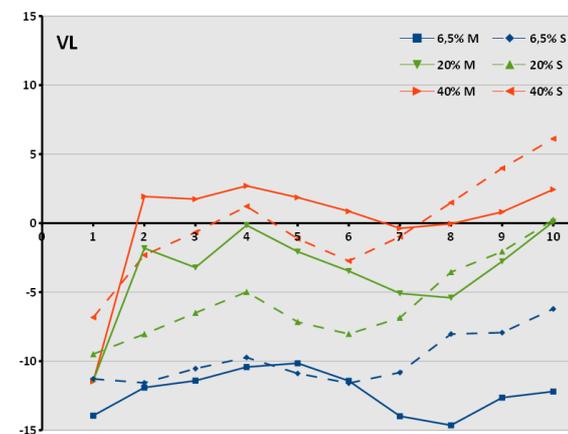
VL_i -orientierte Optimierungen



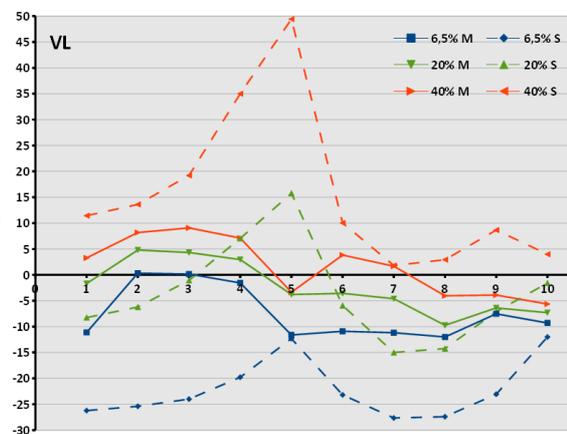
$U_o (E_{hor})$ -Optimierung



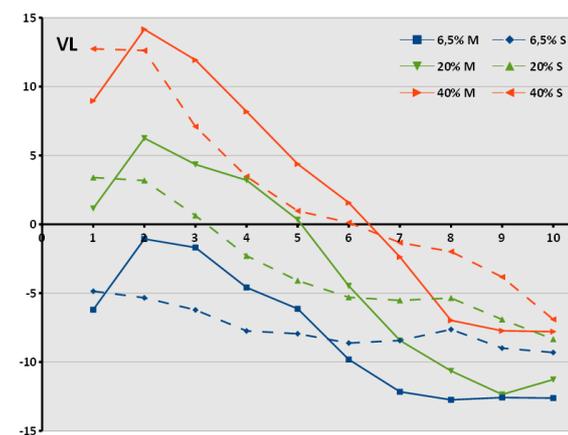
$VL_i (\rho_o = 6,5 \%)$ -Optimierung



$U_o (E_{ver})$ -Optimierung



$VL_i (\rho_o = 20 \%)$ -Optimierung



$U_o (L)$ -Optimierung

Abbildung A.10: Vergleich von Mess- (M) und Simulationsergebnissen (S) für den Mastabstand der fünffachen Lichtpunkthöhe ($S_{rel} = 1/5$) [FRAUENHOFER 2015].

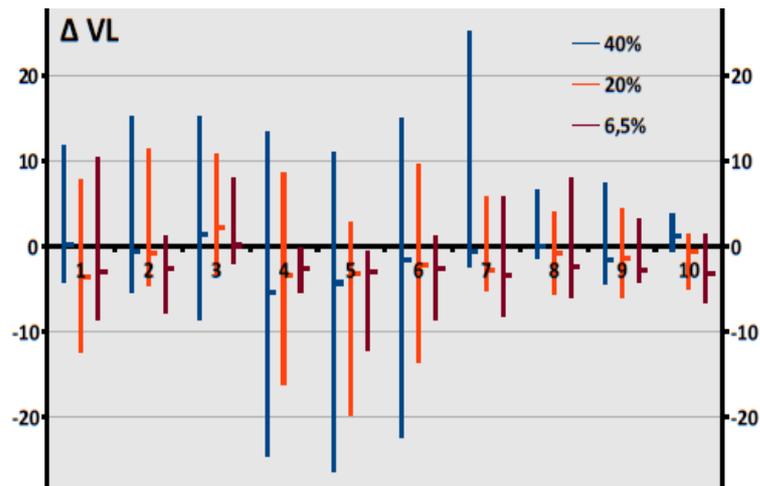


Abbildung A.11: Abweichungen simulierter VL zu im Labor gemessenen in [%] bei relativem Mastabstand ($S_{rel}=1/3$). Positive Abweichung entspricht höherem Wert in der Simulation [FRAUENHOFER 2015].

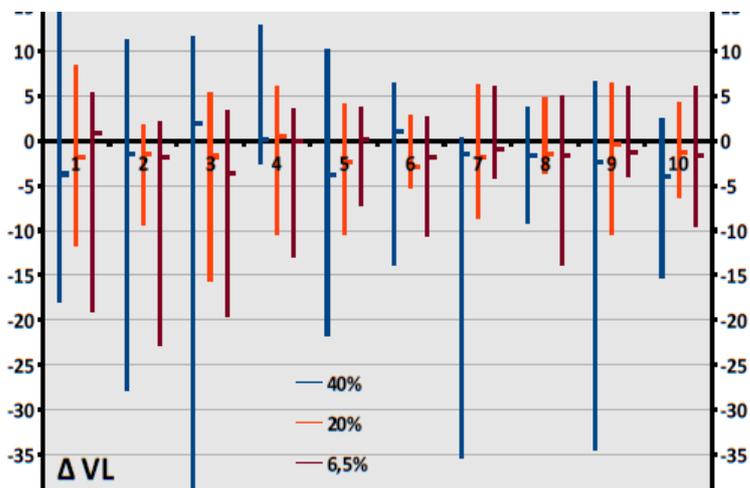


Abbildung A.12: Abweichungen simulierter VL zu im Labor gemessenen in [%] bei relativem Mastabstand ($S_{rel}=1/4$). Positive Abweichung entspricht höherem Wert in der Simulation [FRAUENHOFER 2015].

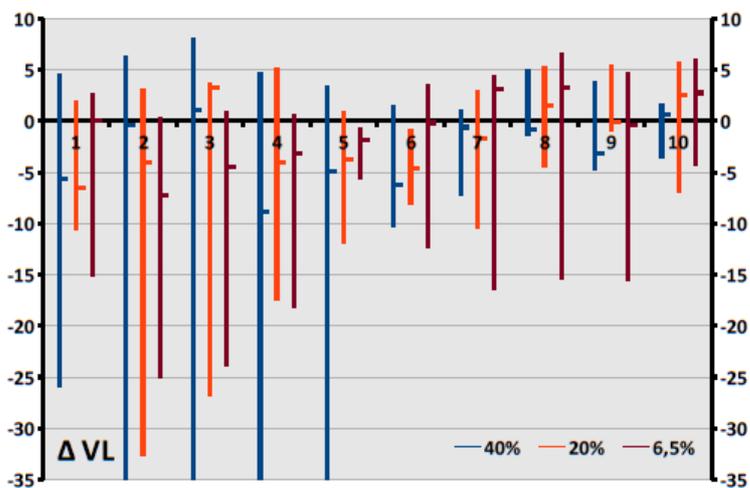


Abbildung A.13: Abweichungen simulierter VL zu im Labor gemessenen in [%] bei relativem Mastabstand ($S_{rel}=1/5$). Positive Abweichung entspricht höherem Wert in der Simulation [FRAUENHOFER 2015].

A.10 DATEN MESSGERÄTE

Tabelle A.40: Unsicherheitsgrenzen für einzelne Merkmale und Gesamtunsicherheitsgrenzen für die Beleuchtungsstärkemessgeräte der Klassen A und B nach [DIN 1985, S. 2].

Merkmal	Bezeichnung nach DIN 5032, Teil 6	Messgeräteklasse	Messgeräteklasse
		A	B
V(λ)-Anpassung	f_1	3 %	6 %
UV-Empfindlichkeit	u	1 %	2 %
IR-Empfindlichkeit	r	1 %	2 %
cos-getreue Bewertung	f_2	1,5 %	3 %
Linearitätsfehler	f_3	1 %	2 %
Fehler des Anzeigeegerätes	f_4	3 %	4,5 %
Ermüdung	f_5	0,5 %	1 %
Temperaturkoeffizient	α_0, α_{25}	0,2 %/K	1 %/K
moduliertes Licht	f_7	0,2 %	0,5 %
Abgleichfehler	f_{11}	0,5 %	1 %
Gesamtfehler ³¹	f_{ges}	5 % ³²	10 % ³³
untere Grenzfrequenz	f_u	40 Hz	40 Hz
obere Grenzfrequenz	f_o	10 ⁵ Hz	10 ⁴ Hz

A.11 VERWANDTE PUBLIKATIONEN

Optimising Visibility in Street Lighting by Optimising and Comparing Luminous Intensity Distributions

Schade, Sebastian; Völker, Stephan

CIE Centenary "Towards a New Century of Light", April 12-19, 2013, Paris

Uniformity- and Visibility-Optimised Luminous Intensity Distributions for Street Lighting

Schade, Sebastian; Völker, Stephan; Steblau, Juri; Fraas, Philipp

Tagungsband Lux Europa, September 17-19, 2013, Krakow

Neue Planungs- und Entwicklungsverfahren zur Bestimmung adaptiver Lichtverteilungen in der LED-Straßenbeleuchtung

Schade, Sebastian; Steblau, Juri; Lu, Yu-Wen; Scheibler, Beate; Völker, Stephan

Tagungsband 11. Lux Junior. Dörfeld/Ilmenau: LiTG, 2013, ISBN/ISSN 978-3-927787-46-9

³¹ „Beim Gesamtfehler ist die Unsicherheit des beim Kalibrieren verwendeten Normal (nach Prüfschein) eingeschlossen (siehe Kalibrierbedingungen nach DIN 5032 Teil 6)“ [DIN 1985, S.2].

³² „Summe der Werte $f_1, u, r, f_2, f_3, f_4, \alpha \cdot 10 \text{ K}, f_5, f_7, f_{11}$ zzgl. Kalibrierunsicherheit des Normal“ [DIN 1985, S.2].

³³ Ebenda.