

Optimierung von Frontscheinwerferlichtverteilungen anhand wahrnehmungsphysiologischer Kriterien

Optimization of headlamp light distributions based on physiological perception criteria

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Genehmigte Dissertation von Anil Erkan, M.Sc. aus Frankfurt am Main

Tag der Einreichung: 09. Januar 2023, Tag der Prüfung: 05. Mai 2023

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh
 2. Gutachten: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
- Darmstadt 2023 – D17
Technische Universität Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Elektrotechnik
und Informationstechnik

Fachgebiet für Adaptive
Lichttechnische Systeme
und Visuelle Verarbeitung

Optimierung von Frontscheinwerferlichtverteilungen anhand wahrnehmungsphysiologischer Kriterien
Optimization of headlamp light distributions based on physiological perception criteria

Genehmigte Dissertation von Anil Erkan, M.Sc.

Tag der Einreichung: 09. Januar 2023

Tag der Prüfung: 05. Mai 2023

Darmstadt 2023 – D17

Technische Universität Darmstadt

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-238055

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/23805>

Jahr der Veröffentlichung auf TUpriints: 2023

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Erklärungen laut Promotionsordnung

§ 8 Abs. 1 lit. c PromO

Ich versichere hiermit, dass die elektronische Version meiner Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

§ 8 Abs. 1 lit. d PromO

Ich versichere hiermit, dass zu einem vorherigen Zeitpunkt noch keine Promotion versucht wurde. In diesem Fall sind nähere Angaben über Zeitpunkt, Hochschule, Dissertationsthema und Ergebnis dieses Versuchs mitzuteilen.

§ 9 Abs. 1 PromO

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

§ 9 Abs. 2 PromO

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, 09. Januar 2023

A. Erkan

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung von Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilungen anhand wahrnehmungsphysiologischer Kriterien, um sowohl die subjektiv wahrgenommene als auch die objektive Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr zu erhöhen. Hierfür werden innerhalb und außerhalb geschlossener Ortschaften insgesamt vier Feldstudien zur Helligkeitswahrnehmung und Objektdetektion durchgeführt.

Die durchgeführten Studien zur Helligkeitswahrnehmung zeigen, dass der hierfür relevante Bereich sich bis zu einer Entfernung von 32 m vor dem Fahrzeug erstreckt. Des Weiteren zeigen die Studien, dass die Helligkeitswahrnehmung von Fahrzeugführern sowohl von der Fahrgeschwindigkeit als auch von dem bereits ohne die Kfz-Beleuchtung vorhandenen Leuchtdichteniveau auf der Fahrbahn abhängt. So werden gleiche Fahrbahnleuchtdichten bei höheren Fahrgeschwindigkeiten dunkler wahrgenommen. Wird das Leuchtdichteniveau der Fahrbahn erhöht, so ist ein exponentieller Anstieg der für das subjektive Sicherheitsgefühl erforderlichen Fahrbahnleuchtdichte aufgrund der relativen und logarithmischen Helligkeitswahrnehmung des Menschen zu beobachten. Insgesamt wird für die Auslegung von Frontscheinwerferlichtverteilungen für die Vorfeldausleuchtung eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte von $1,0 \text{ cd m}^{-2}$ empfohlen, um ein adäquates Sicherheitsgefühl hervorzurufen.

Die Studien zur Objektdetektion zeigen, dass außerhalb geschlossener Ortschaften ein Visibility Level VL von 13,35 benötigt wird, um Objekte sicher zu detektieren. Zusätzlich ist das benötigte Visibility Level winkelabhängig. So erreicht das benötigte Visibility Level im fovealen Bereich des Sichtfelds seinen Maximalwert und nimmt in der Peripherie gaußförmig ab. Innerhalb geschlossener Ortschaften sind die Beleuchtungssituationen derart komplex, dass eine statische Optimierung von Frontscheinwerferlichtverteilungen nicht sinnvoll ist. Eine kamerabasierte und dynamisch voll adaptive Lichtverteilungsregelung ist im nächtlichen urbanen Verkehrsraum besser geeignet. Für diese Lichtverteilungsgenerierung ist der Negativkontrast dem Positivkontrast vorzuziehen, da die durchgeführten Studien zeigen, dass der durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung erzeugte Negativkontrast auf städtischen Straßen der Beleuchtungsklassen M4 bis M6 bessere Detektionsbedingungen zur Verfügung stellt als der Positivkontrast, welcher durch die Kfz-Frontscheinwerfer erzeugt wird.

Die Ergebnisse der durchgeführten Studien werden genutzt, um Berechnungsvorschriften zu modellieren, welche anhand definierbarer Optimierungsparameter wie der Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} , der horizontalen Gleichmäßigkeit U_h oder dem Visibility Level VL Lichtstärkeverteilungen erzeugen. Diese Modelle werden genutzt, um exemplarisch eine optimierte Frontscheinwerferlichtverteilung, bestehend aus einer Grundlichtverteilung und einem segmentierten Fahrlicht, zu generieren.

Abstract

The present work deals with the optimization of vehicle headlight distributions on the basis of physiological perception criteria in order to increase both subjectively perceived and objective safety in road traffic at night. For this purpose, a total of four field studies on brightness perception and object detection are carried out inside and outside built-up areas.

The studies conducted on brightness perception show that the relevant range extends up to a distance of 32 m in front of the vehicle. Furthermore, the studies show that the brightness perception of drivers depends on the driving speed as well as on the luminance level on the road that is already present without the vehicle lighting. Thus, the same roadway luminance levels are perceived as darker at higher driving speeds. If the luminance level of the road is increased, an exponential increase in the luminance required for the subjective feeling of safety can be observed due to the relative and logarithmic brightness perception of humans. Overall, an average roadway luminance of 1.0 cd m^{-2} is recommended for the design of headlight distributions for apron illumination in order to evoke an adequate feeling of safety.

The studies on object detection show that a Visibility Level VL of 13.35 is required outside built-up areas in order to reliably detect objects. In addition, the required Visibility Level depends on the angle. Thus, the necessary Visibility Level reaches its maximum value in the foveal area of the field of view and decreases in a Gaussian shape in the periphery. Within built-up areas, the lighting situations are so complex that a static optimization of headlight distributions is not reasonable. A camera-based and dynamically fully adaptive light distribution control is more suitable for night-time urban traffic. For this light distribution generation, the negative contrast is to be given priority over the positive contrast, since the studies conducted show that the negative contrast generated by the fixed street lighting on urban streets of the lighting classes M4 to M6 provides better detection conditions than the positive contrast generated by the motor vehicle headlights.

The results of the studies conducted are used to model calculation rules that generate luminous intensity distributions based on definable optimization parameters such as the roadway luminance L_{avg} , the horizontal uniformity U_h or the Visibility Level VL. These models are used to generate an optimized headlight distribution consisting of a base light distribution and a segmented driving light.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Forschungstätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Adaptive Lichttechnische Systeme und Visuelle Verarbeitung der Technischen Universität Darmstadt. Ich möchte die folgenden Zeilen dazu nutzen, den Personen zu danken, die einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh, gilt mein besonderer Dank für die Themenstellung und intensive Betreuung dieser Arbeit. Die Betreuungssituation während meiner Tätigkeit am Fachgebiet war stets vorbildlich. Herr Prof. Khanh ließ mir während meiner gesamten Zeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter großen Freiraum in der Gestaltung und Strukturierung meiner Forschungstätigkeiten und war gleichzeitig offen für viele fachlichen Diskussionen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für die Übernahme des Korreferats und dem damit verbundenen Interesse an meiner Arbeit.

Meinem Kollegen David Hoffmann bin ich ebenfalls zu großem Dank verpflichtet. Ohne die vielen fachlichen Diskussionen und verbrachten Stunden bei nächtlichen Probandenstudien wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Außerdem danke ich meinen Kollegen Timo Singer, Markus Peier, Korbinian Kunst, Jens Balasus, Julian Klages und Max Wagner für ihre fortwährende Unterstützung. Des Weiteren bedanke ich mich bei allen weiteren Kollegen, Studierenden und Versuchspersonen für Ihre Teilnahme und Unterstützung an vielen nächtlichen Feldstudien.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Jonas Kobbert und Herrn Kyriakos Kosmas, die mich schon während meiner Zeit als Student am Fachgebiet als Mentoren unterstützt und mit ihrer Begeisterung für die Kfz-Lichttechnik angesteckt haben.

Zusätzlich bedanke ich mich bei der Merck KGaA, der e-netz Südhessen AG und der Technischen Universität Darmstadt, welche die Teststraßen für die Detektionsstudie innerhalb geschlossener Ortschaften zur Verfügung stellten.

Zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern Vedat und Asiye Erkan und bei meiner Schwester Sinem Erkan dafür bedanken, dass sie mir jederzeit den Rücken gestärkt und mich auf diesem Weg begleitet haben.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Motivation	1
2. Stand der Technik	5
2.1. Abblendlichtverteilung	5
2.2. Fernlichtverteilung	6
2.3. Adaptive Frontbeleuchtungssysteme (AFS)	7
2.3.1. Adaptive Abblendlichtfunktionen	7
2.3.2. Adaptive Fernlichtfunktionen	8
2.3.3. Hochauflösende Scheinwerfersysteme	10
3. Stand der Forschung	11
3.1. Wahrnehmungsphysiologische Grundlagen des visuellen Systems	11
3.2. Helligkeitswahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr	13
3.2.1. Studien zu objektiven sicherheitsrelevanten Parametern	13
3.2.2. Studien zu subjektiven sicherheitsrelevanten Parametern	18
3.3. Detektion im nächtlichen Straßenverkehr	21
3.3.1. Detektion außerhalb geschlossener Ortschaften	29
3.3.2. Detektion innerhalb geschlossener Ortschaften	37
3.4. Abgeleitete Forschungsfragen	40
3.4.1. Grundkonzept für situativ adaptive Scheinwerferlichtverteilungen	41
3.4.2. Forschungsfragen zur Helligkeitswahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr	41
3.4.3. Forschungsfragen zur Detektion im nächtlichen Straßenverkehr	42
4. Helligkeitswahrnehmung im Straßenverkehr	43
4.1. Außerhalb geschlossener Ortschaften	44
4.1.1. Studienkonzept	44
4.1.2. Ergebnisse	46
4.2. Innerhalb geschlossener Ortschaften	54
4.2.1. Studienkonzept	54
4.2.2. Ergebnisse	55
4.3. Fazit zur Helligkeitswahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr	59
5. Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr	63
5.1. Außerhalb geschlossener Ortschaften	63
5.1.1. Studienkonzept	63
5.1.2. Ergebnisse	66
5.2. Innerhalb geschlossener Ortschaften	73
5.2.1. Studienkonzept	73
5.2.2. Ergebnisse	77
5.3. Fazit zur Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr	86

6. Situativ optimierte Frontscheinwerferlichtverteilungen	89
6.1. Helligkeitsoptimierte Frontscheinwerferlichtverteilungen	89
6.2. Detektionsoptimierte Frontscheinwerferlichtverteilungen	95
7. Fazit und Ausblick	101
Literaturverzeichnis	105
A. Anhang	117
A.1. Leuchtdichte-, Kontrast- und Visibility Level-Verläufe der Studie zur Detektion außerorts im Lichtkanal	117
A.2. Zusammenhang zwischen Visibility Level und Objektdetektionswahrscheinlichkeit außerorts im Lichtkanal	136
A.3. Objektgröße α der Graukarte in Abhängigkeit des Abstands	145
A.4. Weberkontrast K_W auf den Graukarten bei der zweiten Konstellation auf den drei Teststraßen im nächtlichen urbanen Verkehrsraum	146
A.5. Berechnetes Visibility Level VL auf den Graukarten bei der zweiten Konstellation auf den drei Teststraßen im nächtlichen urbanen Verkehrsraum	149
A.6. Anteil an detektierten Objektpositionen für die zweite Konstellation auf den untersuchten Teststraßen	150

Abbildungsverzeichnis

1.1. Getötete bei Nachtunfällen in Deutschland	1
1.2. Technologische Innovationen im Bereich der AFS-Funktionen im Automobil.	2
1.3. Verlauf der Urbanisierung in Deutschland und weltweit	2
1.4. Beleuchtungssituationen im Straßenverkehr	3
1.5. Struktur der vorliegenden Arbeit	4
2.1. Beispiel für eine Abblendlichtverteilung	5
2.2. Beispiel für eine Fernlichtverteilung	7
2.3. Schematische Darstellung der adaptiven Abblendlichtfunktionen	8
2.4. Funktionsweise eines ADB-Systems mit LED-Segmenten	9
2.5. Beispiel für eine ADB-Lichtverteilung	9
2.6. Durch hochauflösende Scheinwerfersysteme realisierbare Fahrbahnprojektionen	10
3.1. Exemplarische Darstellung der psychophysikalischen Beziehung	11
3.2. Verteilung von Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut nach OSTERBERG	12
3.3. Verlauf der Dunkeladaptation nach RUSHTON	13
3.4. Einfluss der Umgebungslichtbedingungen auf die Unfallzahlen in den USA von 1987 bis 1997	14
3.5. Verlauf des Nacht-zu-Tag-Unfallverhältnisses in Abhängigkeit der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte nach JACKETT und FRITH	15
3.6. Schweregrad von Verletzungen bei Unfällen auf verschiedenen Straßentypen und bei verschiedenen Umgebungslichtbedingungen	16
3.7. Verlauf des benötigten Weberkontrastes K_W in Abhängigkeit der Fahrbahnleuchtdichte nach DAMASKY	17
3.8. Betrachtete Beleuchtungsszenarien für die statische (links) und dynamische (rechts) Untersuchung von HAANS und DE KORT	20
3.9. Kontrastpolaritäten	21
3.10. Versuchsaufbau der Detektionsstudie mit geteiltem Adaptationsfeld nach DAMASKY	22
3.11. Objektgrößenabhängige Bereiche für die Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} nach ADRIAN für verschiedene Umfeldleuchtdichten L_U	23
3.12. Alterseinfluss auf die Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} nach BLACKWELL	24
3.13. Zusammenhang zwischen der betrachteten Detektionswahrscheinlichkeit und dem k -Faktor im STV Modell nach ADRIAN	26
3.14. Leuchtdichtefaktor β der Oberbekleidung von Fußgängern in Dänemark nach RANDRUP HANSEN und SCHANDEL LARSEN	27
3.15. Leuchtdichtefaktor β der Oberbekleidung von Fußgängern aus städtischen und ländlichen Gebieten in Dänemark nach RANDRUP HANSEN und SCHANDEL LARSEN	28
3.16. Abhängigkeit der benötigten Objektleuchtdichte L_O von der Objektgröße α (links) und dem Exzentrizitätswinkel Θ (rechts) nach DAMASKY	30
3.17. Versuchsaufbau der Felduntersuchungen zum Einfluss des Exzentrizitätswinkels Θ auf die Detektionsentfernung nach SCHNEIDER	31

3.18. Abhängigkeit der benötigten Lichtstärke I für ein Detektionsobjekt in etwa 90 m Entfernung in Abhängigkeit des Exzentrizitätswinkels Θ nach den Felduntersuchungen von SCHNEIDER . . .	32
3.19. Fernlichtnutzung auf Landstraßen	34
3.20. Blendungssituation durch zu hohe Fernlichtintensität bei der Anleuchtung von Verkehrszeichen (oben), durch KOSMAS vorgeschlagene Fernlichtintensitätssteuerung für die ideale Anleuchtung von Verkehrszeichen (unten)	36
3.21. Kontrastübergang durch das Zusammenspiel der ortsfesten Straßenbeleuchtung und der Kfz-Beleuchtung innerhalb geschlossener Ortschaften	38
3.22. Unterschied in der Kontrastverteilung von kleinen und vertikal ausgedehnten Objekten nach BHAGAVATHULA et al.	40
3.23. Grundkonzept situativ adaptiver Lichtverteilungen	41
4.1. Gedimmte Abblendlichtverteilungen des verwendeten LED-Scheinwerfers des BMW 318d xDrive Touring	43
4.2. Versuchsaufbau für die Untersuchungen der für die Helligkeitswahrnehmung relevanten Bereiche	44
4.3. Leuchtdichtebild der statischen Helligkeitsuntersuchung außerhalb geschlossener Ortschaften bei der PWM-Stufe 255	45
4.4. Durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichten in den drei Vorfeldbereichen in Abhängigkeit der eingestellten PWM-Stufe des LED-Abblendlichts	46
4.5. Gegenüberstellung der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichten in den drei Vorfeldbereichen	47
4.6. Ergebnisse der Relevanzbenotung für die drei Vorfeldbereiche	48
4.7. Median der Helligkeitsbewertung in Abhängigkeit der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten	49
4.8. Anteil der „hell“-Bewertungen bei verschiedenen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} und Geschwindigkeiten v	52
4.9. Benötigte Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit v	53
4.10. Teststraßen für die Studie zur Helligkeitswahrnehmung innerhalb geschlossener Ortschaften .	54
4.11. Durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} auf den drei beleuchteten Teststraßen in Abhängigkeit der PWM-Stufe des Abblendlichts	55
4.12. Logistische Regression der Probandenbewertungen zur subjektiv wahrgenommenen Sicherheit beim Führen eines Kraftfahrzeuges auf der beleuchteten Teststraße 1	56
4.13. Logistische Regression der Probandenbewertungen zur subjektiv wahrgenommenen Sicherheit beim Führen eines Kraftfahrzeuges auf der beleuchteten Teststraße 2	57
4.14. Logistische Regression der Probandenbewertungen zur subjektiv wahrgenommenen Sicherheit beim Führen eines Kraftfahrzeuges auf der beleuchteten Teststraße 3	58
4.15. Zusammenhang zwischen der benötigten Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} und dem Leuchtdichtenniveau $L_{avg,0}$	58
5.1. Schematische Darstellung der Messraster für die Detektionsstudien außerhalb geschlossener Ortschaften	64
5.2. Exemplarische Darstellung der aufgezeichneten Leuchtdichtebilder für den Lichtkanal (links) und das abgesperrte Testgelände (rechts)	66
5.3. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 1 im Lichtkanal	67
5.4. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 1 im Lichtkanal	67
5.5. Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 1 im Lichtkanal	68

5.6. Winkelabhängigkeit des Visibility Levels VL	70
5.7. Zusammenhang zwischen dem Visibility Level VL und dem Anteil an Objektpositionen im Lichtkanal, bei dem die Graukarte sicher detektiert wird	71
5.8. Zusammenhang zwischen dem Visibility Level VL und dem Anteil an Objektpositionen auf dem abgesperrten Testgelände, bei dem die Graukarte sicher detektiert wird	72
5.9. Teststraßen, auf denen die Studie durchgeführt wird	73
5.10. Leuchtdichteaufnahmen der Teststraßen, auf denen die Studie durchgeführt wird	74
5.11. Schematische Darstellung der Messraster für die Detektionsstudien innerhalb geschlossener Ortschaften	75
5.12. Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 1 bei Konstellation 1	78
5.13. Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 2 bei Konstellation 1	79
5.14. Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 3 bei Konstellation 1	80
5.15. Leuchtdichteaufnahmen zur Veranschaulichung des Kontrastverlaufs vom Negativ- zum Positivkontrast im nächtlichen urbanen Verkehrsraum	81
5.16. Leuchtdichteaufnahmen zur Veranschaulichung der durch die Erhöhung der Abblendlichtintensität erzeugten Kontrastreduktion im nächtlichen urbanen Verkehrsraum	82
5.17. Graukarte an Objektposition 15 auf Teststraße 2	85
6.1. Durch das Kriterium der homogenen Gleichmäßigkeit U_h modifizierte Gaußfunktion	91
6.2. Fahrbahnleuchtdichteverläufe mit gleicher durchschnittlicher Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von 1 cd m^{-2} im horizontalen Winkelbereich von -15° bis 15°	92
6.3. Exemplarisch generierte helligkeitsoptimierte Lichtverteilungen	94
6.4. Anwendbare Visibility Level Verläufe für die detektionsbasierte Optimierung von Frontscheinwerferlichtverteilungen	96
6.5. Abhängigkeit der erforderlichen Lichtstärke vom Objektabstand	98
6.6. Exemplarische situativ adaptive Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilung	99
A.1. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 2 im Lichtkanal	117
A.2. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 2 im Lichtkanal	117
A.3. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 3 im Lichtkanal	118
A.4. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 3 im Lichtkanal	118
A.5. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 4 im Lichtkanal	119
A.6. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 4 im Lichtkanal	119
A.7. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 5 im Lichtkanal	120

A.8. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 5 im Lichtkanal	120
A.9. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 6 im Lichtkanal	121
A.10. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 6 im Lichtkanal	121
A.11. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 7 im Lichtkanal	122
A.12. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 7 im Lichtkanal	122
A.13. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 8 im Lichtkanal	123
A.14. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 8 im Lichtkanal	123
A.15. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 9 im Lichtkanal	124
A.16. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 9 im Lichtkanal	124
A.17. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 10 im Lichtkanal	125
A.18. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 10 im Lichtkanal	125
A.19. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 11 im Lichtkanal	126
A.20. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 11 im Lichtkanal	126
A.21. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 12 im Lichtkanal	127
A.22. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 12 im Lichtkanal	127
A.23. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 13 im Lichtkanal	128
A.24. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 13 im Lichtkanal	128
A.25. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 14 im Lichtkanal	129
A.26. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 14 im Lichtkanal	129
A.27. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 15 im Lichtkanal	130
A.28. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 15 im Lichtkanal	130
A.29. Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 16 im Lichtkanal	131
A.30. Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 16 im Lichtkanal	131

A.31.Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 17 im Lichtkanal	132
A.32.Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 17 im Lichtkanal	132
A.33.Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 18 im Lichtkanal	133
A.34.Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 18 im Lichtkanal	133
A.35.Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 19 im Lichtkanal	134
A.36.Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 19 im Lichtkanal	134
A.37.Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 20 im Lichtkanal	135
A.38.Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 20 im Lichtkanal	135
A.39.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 2 im Lichtkanal	136
A.40.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 3 im Lichtkanal	136
A.41.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 4 im Lichtkanal	137
A.42.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 5 im Lichtkanal	137
A.43.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 6 im Lichtkanal	138
A.44.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 7 im Lichtkanal	138
A.45.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 8 im Lichtkanal	139
A.46.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 9 im Lichtkanal	139
A.47.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 10 im Lichtkanal	140
A.48.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 11 im Lichtkanal	140
A.49.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 12 im Lichtkanal	141
A.50.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 13 im Lichtkanal	141
A.51.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 14 im Lichtkanal	142
A.52.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 15 im Lichtkanal	142
A.53.Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 16 im Lichtkanal	143

A.54. Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 17 im Lichtkanal	143
A.55. Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 18 im Lichtkanal	144
A.56. Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 19 im Lichtkanal	144
A.57. Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 20 im Lichtkanal	145
A.58. Objektgröße α der Graukarte in Abhängigkeit des Abstands	145
A.59. Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 1 bei Konstellation 2	146
A.60. Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 2 bei Konstellation 2	147
A.61. Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 3 bei Konstellation 2	148

Tabellenverzeichnis

3.1. Adaptationsbereiche und Ihre Eigenschaften	12
3.2. CIE-Werte für den Leuchtdichtekoeffizienten q_0 verschiedener Fahrbahnoberflächen	29
3.3. Vergleich der Reaktionszeiten bei Verwendung von Abblend-, Fern- und Markierungslicht	33
3.4. Vergleich der Detektionsdistanzen und der Blendungsergebnisse bei Verwendung von Abblend-, Fern- und blendfreiem Fernlicht mit Halogen- und Xenonlampen	34
3.5. Detektionsentfernungen bei Verwendung der Abblendlicht-, Fernlicht- und LASER-Zusatzfernlichtfunktion	35
3.6. Anzahl der Versuchspersonen, die für die verschiedenen Akzeptanzkriterien eine der drei präsentierten Lückenbreiten bevorzugen	35
3.7. Photometrische Anforderungen für die M-Beleuchtungsklassen nach EN 13201	37
3.8. 5-stufige Skala für die subjektive Bewertung der Objektsichtbarkeit nach BACELAR	39
4.1. Übersicht der Studie zur Helligkeitswahrnehmung außerhalb geschlossener Ortschaften	46
4.2. Korrelationskoeffizienten ρ_S und p -Werte für die Überprüfung der signifikanten Korrelation zwischen der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte und dem Median der Helligkeitsbewertung außerhalb geschlossener Ortschaften	49
4.3. Durch den Friedman-Test berechnete p -Werte für den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Helligkeitsbewertung	50
4.4. Durch den post hoc Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test berechnete p -Werte für den paarweisen Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten v auf die Helligkeitsbewertung bei den verschiedenen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg}	51
4.5. Notwendige Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} bei verschiedenen Wahrscheinlichkeiten p für „hell“-Bewertungen der Vorfeldausleuchtung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v	53
5.1. Zuordnung der Objektpositionen zu Messrasterpunkten im Lichtkanal	65
5.2. Zuordnung der Objektpositionen zu Messrasterpunkten auf dem abgesperrten Testgelände	65
5.3. Benötigtes Visibility Level VL auf den verschiedenen Objektpositionen im Lichtkanal	69
5.4. Benötigtes Visibility Level VL auf den verschiedenen Objektpositionen auf dem abgesperrten Testgelände	71
5.5. Charakteristische Merkmale der Teststraßen für die Detektionsstudie innerhalb geschlossener Ortschaften	74
5.6. Zuordnung der Objektpositionen zu Messrasterpunkten bei Konstellation 1 der Detektionsstudie im nächtlichen urbanen Verkehrsraum	76
5.7. Zuordnung der Objektpositionen zu Messrasterpunkten bei Konstellation 2 der Detektionsstudie im nächtlichen urbanen Verkehrsraum	76
5.8. Detektionsbedingungen bei den einstellbaren Extremwerten für die relative Abblendlichtintensität	81
5.9. Berechnete Visibility Level VL für die erste Konstellation auf Teststraße 1	82
5.10. Berechnete Visibility Level VL für die erste Konstellation auf Teststraße 2	83
5.11. Berechnete Visibility Level VL für die erste Konstellation auf Teststraße 3	84

5.12. Anteil an detektierten Objektpositionen für die erste Konstellation auf den untersuchten Teststraßen	85
5.13. Minimale Detektionswahrscheinlichkeiten für die Graukarte im Vorfeldbereich des Fahrzeugs bis 32 m Entfernung	86
6.1. Gewählte Parameter für die Generierung einer helligkeitsoptimierten Frontscheinwerferlichtverteilung	93
6.2. Gewählte Parameter für die Generierung einer detektionsoptimierten Frontscheinwerferlichtverteilung	97
A.1. Berechnete Visibility Level VL für die zweite Konstellation auf Teststraße 1	149
A.2. Berechnete Visibility Level VL für die zweite Konstellation auf Teststraße 2	149
A.3. Berechnete Visibility Level VL für die zweite Konstellation auf Teststraße 3	149
A.4. Anteil an detektierten Objektpositionen für die zweite Konstellation auf den untersuchten Teststraßen	150

Abkürzungsverzeichnis

- ADB** Adaptive Driving Beam
- AFS** Adaptive Frontbeleuchtungssysteme
- CIE** Commission International de l'Éclairage
- DIN** Deutsches Institut für Normung
- DMD** Digital Micromirror Device
- EN** Europäische Norm
- gfHB** glare-free High Beam
- GPS** Global Positioning System
- HDG** Hell-Dunkel-Grenze
- HID** High Intensity Discharge
- Kfz** Kraftfahrzeug
- LASER** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- LCD** Liquid Crystal Display
- LED** Lichtemittierende Diode
- PKW** Personenkraftwagen
- PWM** Pulsweitenmodulation
- RVP** Relative Visual Performance
- STV** Small Target Visibility
- StVO** Straßenverkehrsordnung
- UE** Unterschiedsempfindlichkeit
- UNECE** United Nations Economic Commission for Europe
- VL** Visibility Level

Symbolverzeichnis

ϕ_h	Horizontaler Winkel in Lichtstärkeverteilungen
ϕ_v	Vertikaler Winkel in Lichtstärkeverteilungen
I	Lichtstärke
φ	Reizstärke
$\Delta\varphi$	Reizstärkedifferenz
Ψ	Empfindungsgröße
$\Delta\Psi$	Empfindungsgrößendifferenz
L_A	Adaptationsleuchtdichte
L_U	Umfeldleuchtdichte
L_O	Objektleuchtdichte
L_{avg}	Durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte
TI	Schwellwerterhöhung durch Blendung (engl. Threshold Increment)
U_0	Gesamtgleichmäßigkeit
U_1	Längsgleichmäßigkeit
cd	Candela
lx	Lux
α	Objektgröße
v	Geschwindigkeit
p	Wahrscheinlichkeit
A	Fläche

R^2	Bestimmtheitsmaß
ρ_P	Pearson'scher Korrelationskoeffizient
ρ_S	Spearman'scher Korrelationskoeffizient
α_B	Signifikanzniveau nach Bonferroni-Korrektur
U_h	Horizontale Gleichmäßigkeit
E	Beleuchtungsstärke
E_r	Radiale Beleuchtungsstärke
q_0	Leuchtdichtekoeffizient
ε	Anleuchtewinkel
β	Leuchtdichtefaktor

1. Einleitung und Motivation

Das visuelle System stellt die Hauptinformationsquelle beim Führen eines Kraftfahrzeugs (Kfz) dar. Es dient dazu, Gefahren frühzeitig zu detektieren und die Anpassung des Fahrverhaltens einzuleiten [13, 48, 66, 149, 155, 158, 183]. Aufgrund der unterschiedlichen Sichtbedingungen am Tag und bei Nacht werden bereits seit über 100 Jahren lichttechnische Einrichtungen am Fahrzeug verwendet, um dem visuellen System vor allem bei Nacht adäquate Sichtbedingungen zur Verfügung zu stellen [147]. Hier spielen vor allem die Detektionsbedingungen und die Helligkeit der Vorfelddausleuchtung eine entscheidende Rolle für die Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr. Die Relevanz geeigneter Sichtbedingungen bei Nacht wird bei der Betrachtung von Verkehrsunfallstatistiken deutlich. Diese zeigen, dass bei einem Verkehrsaufkommen von etwa 20 % in den Dunkelstunden der Anteil tödlicher Verkehrsunfälle etwa 32 % beträgt [43, 109, 151, 181]. Zwar ist hier, wie in Abbildung 1.1 zu sehen, ein fallender Trend seit 1991 zu beobachten; jedoch wird bei mehr als 600 Getöteten bei Nachtunfällen im Jahr 2021 der Handlungsbedarf ebenfalls deutlich.

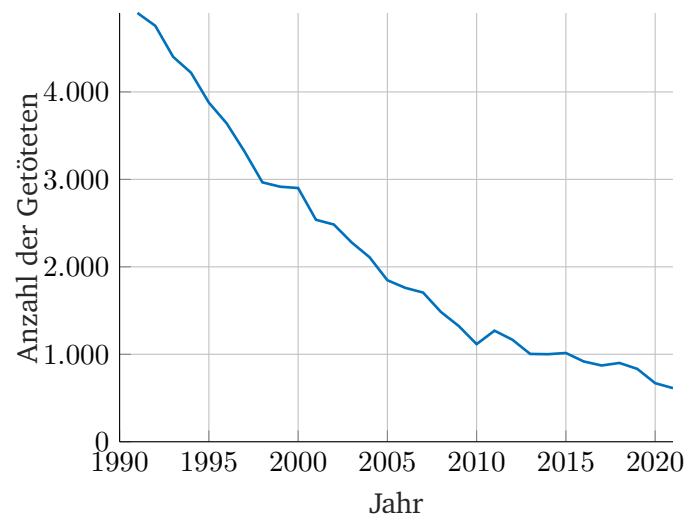


Abbildung 1.1.: Getötete bei Nachtunfällen in Deutschland; in den letzten drei Jahrzehnten reduzierte sich die Anzahl der Getöteten bei Nachtunfällen von 4903 im Jahr 1991 auf 613 im Jahr 2021 [151].

Um diesen fallenden Trend der Getöteten bei Nachtunfällen weiter fortzuführen und dem Handlungsbedarf nachzukommen, wird an der Entwicklung innovativer lichttechnischer Einrichtungen gearbeitet. Während im letzten Jahrhundert Innovationen primär im Bereich der Lichtquellen und der Definition von Lichtverteilungen (asymmetrisches Abblendlicht, Fernlicht) angesiedelt sind, werden seit Beginn des 21. Jahrhunderts die Innovationen stärker im Bereich der adaptiven Frontbeleuchtungssysteme (AFS) erzielt. Beispiele für AFS-Funktionen sind der Fernlichtassistent, welcher das Fernlicht automatisch zuschaltet, oder das blendfreie Fernlicht, welches eine permanente Fernlichtfahrt ermöglicht ohne den Gegenverkehr oder den vorausfahrenden Verkehr zu blenden. Eine Übersicht über die zeitliche Entwicklung der AFS-Funktionen ist in Abbildung 1.2 zu sehen. [121]

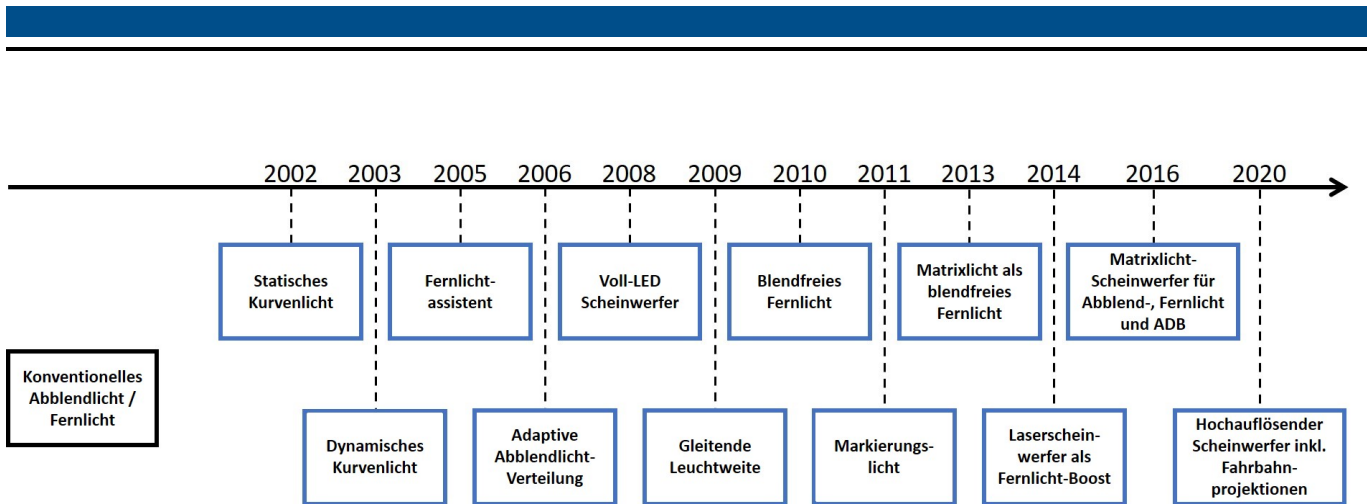


Abbildung 1.2.: Technologische Innovationen im Bereich der AFS-Funktionen im Automobil [121].

Aus Abbildung 1.2 ist zu erkennen, dass ein Großteil der technologischen Innovationen eher im außerstädtischen Bereich relevant sind, da hier eine Maximierung der Fernlichtnutzung und damit einhergehend eine Erhöhung der Sichtweite angestrebt wird, ohne die Blendungsgefahr für andere Verkehrsteilnehmer zu erhöhen. Durch die stetig fortschreitende Urbanisierung und das damit einhergehende Bevölkerungswachstum in Städten erhöht sich auch die Verkehrsdichte im urbanen Verkehrsraum. [47, 88, 112, 175, 176] Wie Abbildung 1.3 zeigt, lag der Anteil der Stadtbevölkerung in Deutschland bereits 1960 bei etwa 71,4%. Dieser Anteil stieg bis 2020 sogar auf etwa 77,5% an. [182] Weltweit lässt sich der gleiche Trend beobachten. Während 1950 lediglich etwa 29,6% der Weltbevölkerung in Städten lebte, wird für das Jahr 2050 ein Stadtbevölkerungsanteil von etwa 66,4% prognostiziert. [44, 164, 165]

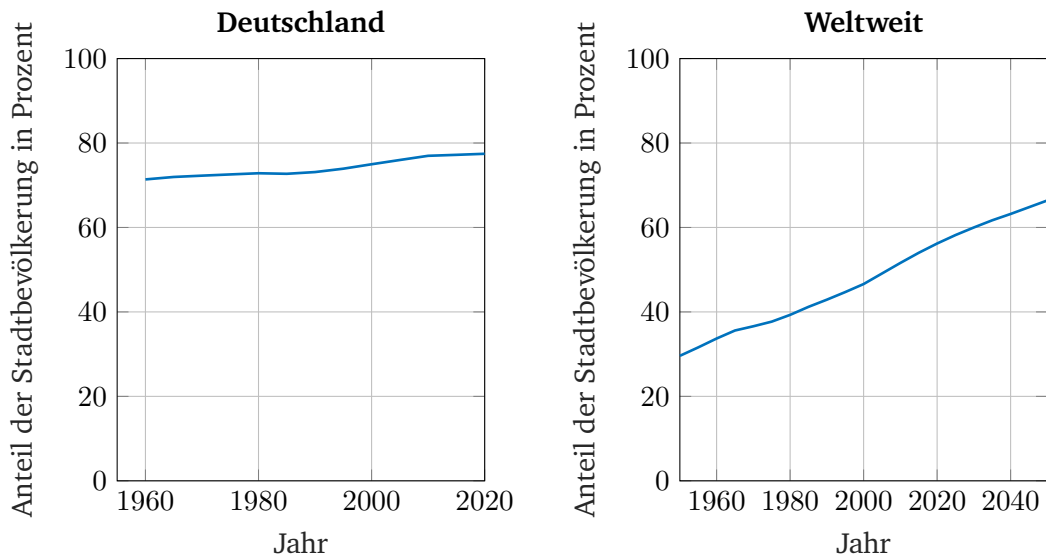


Abbildung 1.3.: Verlauf der Urbanisierung in Deutschland (links) und weltweit (rechts); der steigende Urbanisierungstrend ist sowohl in Deutschland als auch weltweit zu beobachten, wobei der Urbanisierungsgrad in Deutschland im weltweiten Vergleich höher liegt [44, 164, 165, 182].

Somit ist auch der nächtliche Straßenverkehr im urbanen Raum von hoher Relevanz für technologische Innovationen im Bereich der adaptiven Lichtsysteme für Automobile. Zusätzlich ist die Beleuchtungssituation im urbanen Raum im Vergleich zum außerstädtischen Raum unterschiedlich, da im urbanen Verkehrsraum

neben den Kfz-Scheinwerfern auch die ortsfeste Straßenbeleuchtung zur Erzeugung der Beleuchtungssituation beiträgt. So werden durch die europäische Norm EN 13201 in der Stadt anhand von Parametern wie Verkehrsfluss, typische Geschwindigkeit des Hauptnutzers oder Komplexität des Gesichtsfelds verschiedene Beleuchtungsklassen definiert, anhand derer die Straßenbeleuchtung ausgelegt wird. [61–65] Aufgrund dieser Beleuchtungsklassen ist nicht nur die Beleuchtungssituation im Vergleich zum außerstädtischen Bereich unterschiedlich, sondern auch innerhalb des urbanen Verkehrsraums. Abbildung 1.4 veranschaulicht die verschiedenen Beleuchtungssituationen innerhalb und außerhalb des urbanen Verkehrsraums.

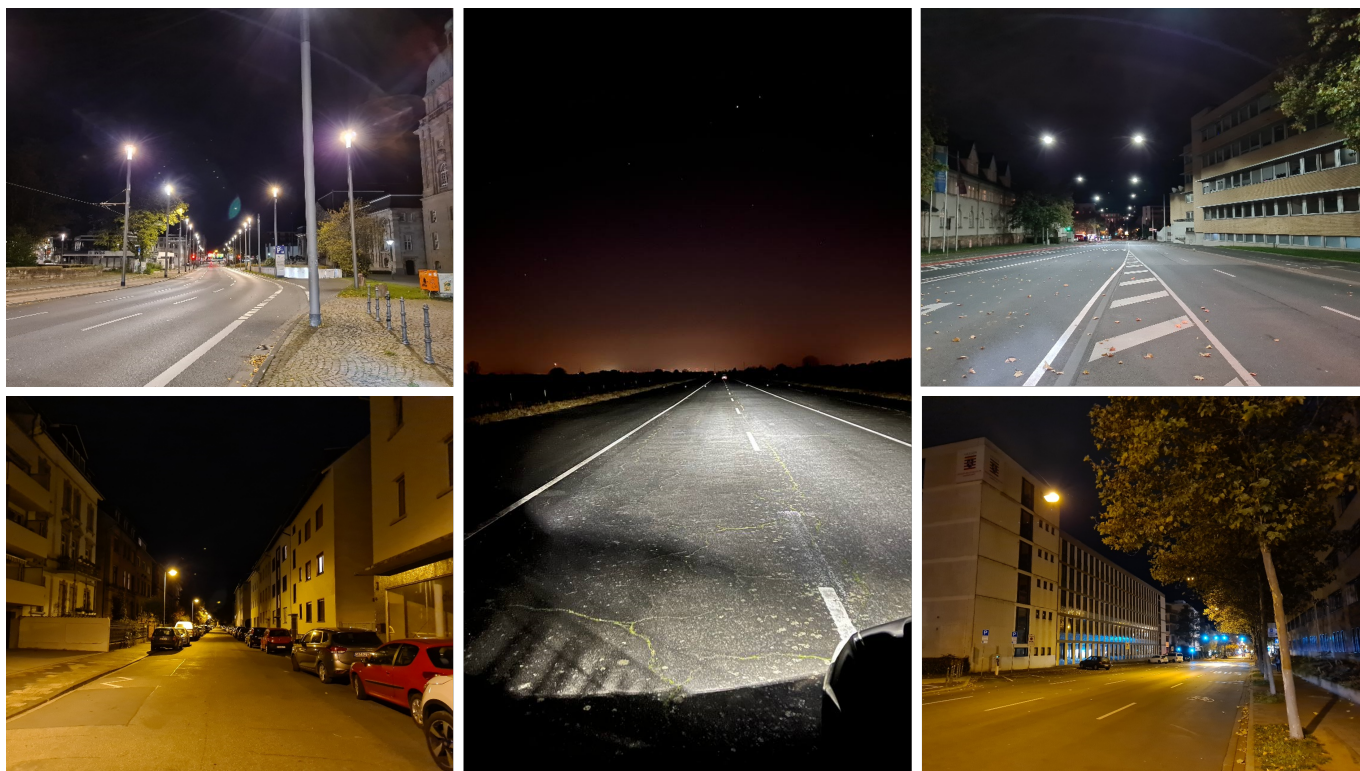


Abbildung 1.4.: Beleuchtungssituationen im Straßenverkehr; aufgrund der ortsfesten Straßenbeleuchtung entstehen unterschiedliche Beleuchtungssituationen, im außerstädtischen Bereich (mitte) sind die Kraftfahrzeug (Kfz)-Scheinwerfer für die Beleuchtungssituation zuständig, im urbanen Raum entsteht die Beleuchtungssituation aus der Kombination von ortsfester Straßenbeleuchtung und Kfz-Scheinwerfern; dabei werden auch in der ortsfesten Straßenbeleuchtung unterschiedliche Lichtquellen wie Lichtemittierende Dioden (LEDs) (oben links und oben rechts) und Natriumdampflampen (unten links und unten rechts) eingesetzt.

Um die AFS-Funktionen weiter zu optimieren und somit die Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr zu erhöhen, ist eine Betrachtung der verschiedenen Verkehrsräume essenziell. Hierbei sind vor allem die objektiv und subjektiv relevanten Sicherheitsparameter Fahrbahnelligkeit und Objektdetektion in den verschiedenen Verkehrsräumen zu betrachten. Die vorliegende Arbeit setzt genau an diesem Punkt an und betrachtet die Detektionsbedingungen, die für eine sichere Objektdetektion notwendig sind, sowie die von den Fahrzeugführern geforderte Fahrbahnelligkeit, die zu einem adäquaten Sicherheitsgefühl führen. Dabei werden beide Parameter sowohl innerhalb als auch außerhalb des urbanen Verkehrsraums betrachtet. Aus diesen Betrachtungen werden Anforderungen an die Lichtstärkeverteilung von Kfz-Scheinwerfern abgeleitet

und diese modelliert. Abbildung 1.5 zeigt eine Übersicht über die Struktur der vorliegenden Arbeit.

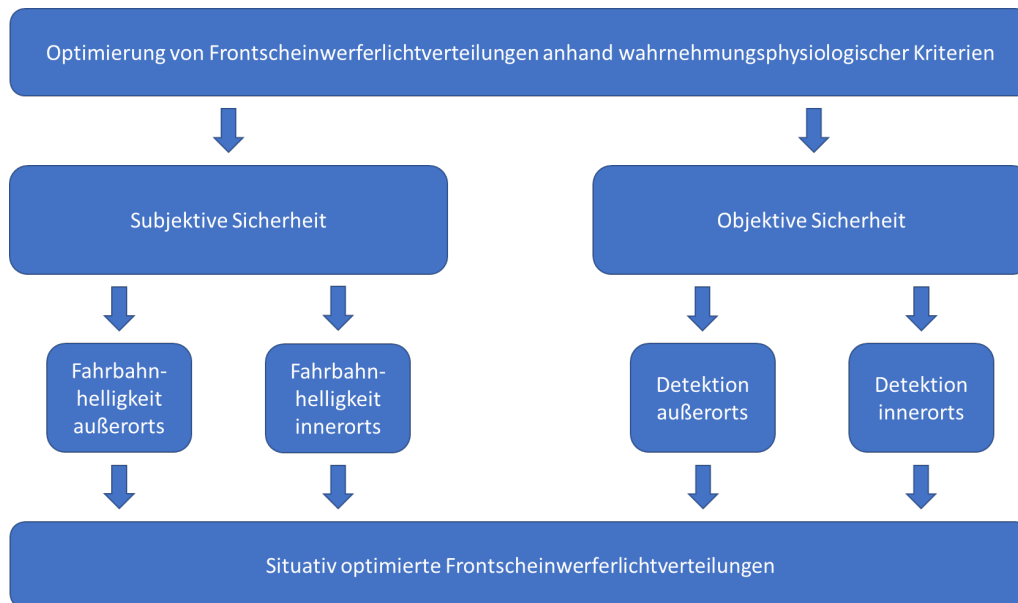


Abbildung 1.5.: Struktur der vorliegenden Arbeit.

Um Lichtverteilungen anhand der Fahrbahnelligkeit und Objektdetektion zu definieren und zu optimieren, werden die Ergebnisse aus vier Probandenstudien ausgewertet und analysiert. Hierzu wird zunächst in Kapitel 2 der Stand der Technik beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 3 der Stand der Forschung zur Kontrast- und Helligkeitswahrnehmung innerhalb und außerhalb des urbanen Verkehrsraums beleuchtet. Dabei werden konventionelle Abblend- und Fernlichtverteilungen und aktuelle AFS-Funktionen erläutert. Aus den Analysen in Kapitel 2 und Kapitel 3 werden die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit abgeleitet. Kapitel 4 beschäftigt sich mit den Probandenstudien zur Bestimmung der geforderten Fahrbahnelligkeit innerhalb und außerhalb des urbanen Verkehrsraums. In Kapitel 5 werden die Detektionsbedingungen innerhalb und außerhalb des urbanen Verkehrsraums untersucht. Die Ergebnisse aus Kapitel 4 und Kapitel 5 werden in Kapitel 6 zur Definition von situativ optimierten Frontscheinwerferlichtverteilungen genutzt bevor die Arbeit in Kapitel 7 mit einem Fazit und Ausblick abschließt.

2. Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden die heutzutage standardmäßig in Kfz-Frontscheinwerfern eingesetzten Lichtfunktionen Abblendlicht, Fernlicht und blendfreies Fernlicht als AFS-Funktion näher beschrieben und ihre Besonderheiten aufgezeigt. Das Verständnis dieser Lichtfunktionen dient im weiteren Verlauf der Arbeit als Grundlage für die allgemeine Definition optimierter Frontscheinwerferlichtverteilungen innerhalb und außerhalb des urbanen Verkehrsraums.

2.1. Abblendlichtverteilung

Die Hauptaufgabe des Abblendlichts besteht darin, den Verkehrsraum für den Fahrzeugführer bestmöglich auszuleuchten und dabei das Blendungsrisiko für andere Verkehrsteilnehmer minimal zu halten [99, 100]. Aus dieser Motivation wird im Jahre 1957 die asymmetrische Abblendlichtverteilung eingeführt [26]. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sie, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, für Rechtsverkehr einen ansteigenden Teil auf der rechten Seite aufweist und so die Sichtweite auf der rechten Fahrbahnseite erhöht, ohne die Blendefahr für den Gegenverkehr zu erhöhen. Für Linksverkehr ist der ansteigende Teil gespiegelt und somit auf der linken Seite der Lichtverteilung zu finden. [159]

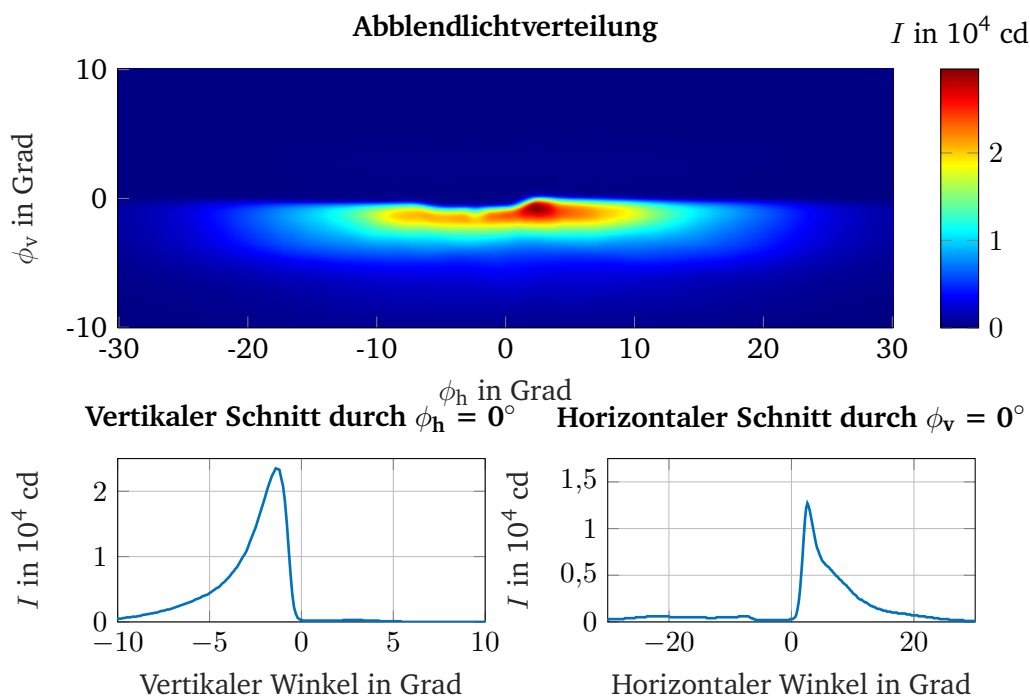


Abbildung 2.1.: Beispiel einer Abblendlichtverteilung in Falschfarbendarstellung (oben); vertikaler Schnitt durch den horizontalen Winkel $\phi_h = 0^\circ$ (unten links), horizontaler Schnitt durch den vertikalen Winkel $\phi_v = 0^\circ$ (unten rechts).

Bei Betrachtung der Abblendlichtverteilung eines Frontscheinwerfers in Falschfarbendarstellung (Abbildung 2.1 oben) sind mehrere Besonderheiten auffällig. Zunächst fällt die Hell-Dunkel-Grenze (HDG) auf, die den asymmetrischen Verlauf der Lichtverteilung beschreibt. Diese ist für die klare Begrenzung des beleuchteten und unbeleuchteten Bereichs vor dem Fahrzeug zuständig und sorgt somit für die Einhaltung der maximal zulässigen Werte im Blendbereich. Die Relevanz der HDG wird im Graphen unten links in Abbildung 2.1 mittels eines vertikalen Schnitts durch den horizontalen Winkel $\phi_h = 0^\circ$ verdeutlicht. So fällt die Lichtstärke durch die HDG von über 20.000 cd im beleuchteten Bereich innerhalb eines sehr kleinen Übergangsbereichs auf einige 100 cd ab. Ohne diese klare Trennung des beleuchteten und unbeleuchteten Bereichs, wäre eine Blendung des Gegenverkehrs nicht vermeidbar. Wird der horizontale Schnitt durch den vertikalen Winkel $\phi_v = 0^\circ$ im Graphen im Abschnitt unten rechts der Abbildung 2.1 betrachtet, ist die zweite Besonderheit der asymmetrischen Abblendlichtverteilung zu erkennen. Hier ist ebenfalls eine klare Trennung des unbeleuchteten und beleuchteten Bereichs zu sehen, welche dafür sorgt, dass einerseits die Blendgefahr für den Gegenverkehr mit Lichtstärken von einigen 100 cd niedrig bleibt und andererseits die Sichtweite auf der rechten Fahrbahnseite durch einen steilen Anstieg auf etwa 12.500 cd deutlich erhöht wird. Unterstützt wird diese Sichtweiterehöhung durch den sogenannten „Hot-Spot“ der Lichtverteilung, welcher sich in der Nähe des Anstiegs der HDG befindet.

Diese Beschreibung des konventionellen Abblendlichts besteht seit der Einführung im Jahr 1957. Zu beachten ist dabei, dass die in Abbildung 2.1 dargestellte Abblendlichtverteilung eine beispielhafte Lichtverteilung darstellt und die absoluten Lichtstärken von den verwendeten Lichtquellen und optischen Konzepten abhängig sind. Daher werden im europäischen Raum durch die United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) je nach Lichtquelle minimale bzw. maximale Absolutwerte für definierte Messpunkte und Messzonen vorgegeben, die durch den Frontscheinwerfer zu erfüllen sind. [159, 161–163]

2.2. Fernlichtverteilung

Das konventionelle Fernlicht ist nach §17 der Straßenverkehrsordnung (StVO) nur dann zu nutzen, wenn keine anderen Verkehrsteilnehmer anwesend sind, die von der Fernlichtverteilung geblendet und damit gefährdet werden können [152]. Bei der Aktivierung des Fernlichts wird das von der Lichtquelle emittierte Licht parallelisiert und nach vorne aus dem Frontscheinwerfer ausgestrahlt. Die zugehörige Lichtverteilung für das Fernlicht ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Falschfarbendarstellung der Fernlichtverteilung im oberen Abschnitt von Abbildung 2.2 zeigt deutlich, dass andere Verkehrsteilnehmer für die Auslegung der Fernlichtverteilung keine Relevanz darstellen. So ist der „Hot-Spot“ der Fernlichtverteilung eher mittig positioniert und die Intensität der Lichtverteilung nimmt mit steigender Exzentrizität ab. Dies ist ebenfalls in den Graphen zu sehen, welche den vertikalen Schnitt durch den horizontalen Winkel $\phi_h = 0^\circ$ (Abbildung 2.2, unten links) und den horizontalen Schnitt durch den vertikalen Winkel $\phi_v = 0^\circ$ (Abbildung 2.2, unten rechts) darstellen. Im Vergleich zur Abblendlichtverteilung weist die Fernlichtverteilung keine steilen Übergänge von unbeleuchteten zu beleuchteten Bereichen auf, sondern gaußförmige Verläufe, deren Maximum im Nullpunkt der Lichtverteilung liegt. Dies liegt an der nicht vorhandenen HDG in der Fernlichtverteilung. Des Weiteren weist die Fernlichtverteilung deutlich höhere Lichtstärken auf als die Abblendlichtverteilung, was die Auslegung der Fernlichtverteilung für die eigene Sichtweitenmaximierung unterstreicht. Die in Abbildung 2.2 dargestellte Fernlichtverteilung eines Frontscheinwerfers weist eine maximale Lichtstärke von etwa 120.000 cd auf, welche wiederum von den verwendeten Lichtquellen und optischen Konzepten abhängen.

Daher schreibt die UNECE für die Fernlichtverteilung ebenfalls minimale bzw. maximale Absolutwerte vor, die für eine Zulassung des Scheinwerfers zu erfüllen sind. [159, 161–163]

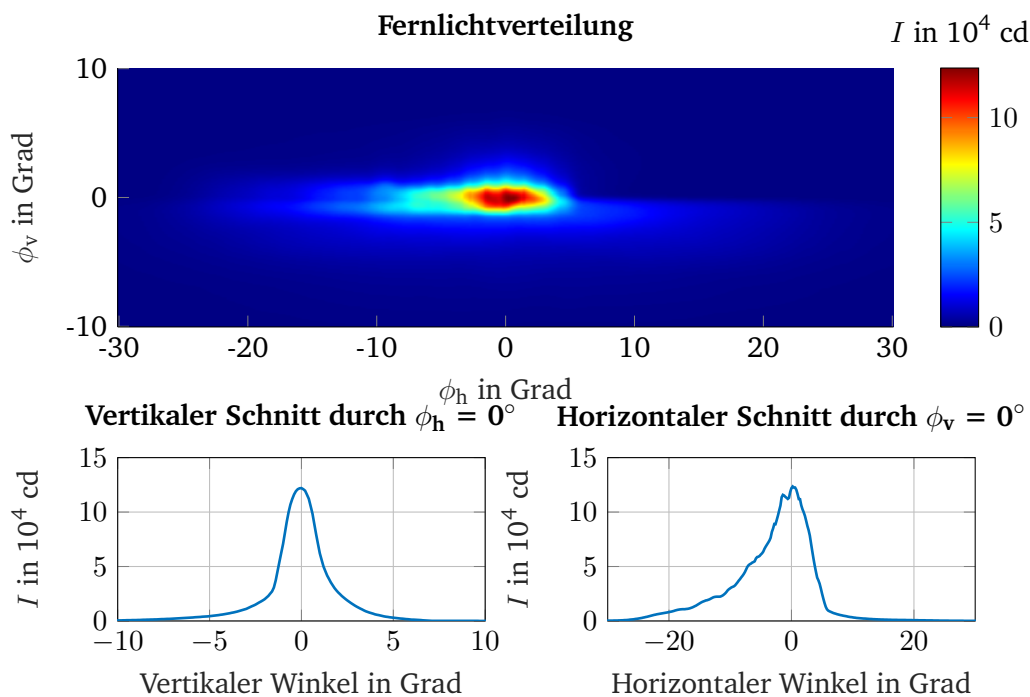


Abbildung 2.2.: Beispiel einer Fernlichtverteilung in Falschfarbendarstellung (oben); vertikaler Schnitt durch den horizontalen Winkel $\phi_h = 0^\circ$ (unten links), horizontaler Schnitt durch den vertikalen Winkel $\phi_v = 0^\circ$ (unten rechts).

2.3. Adaptive Frontbeleuchtungssysteme (AFS)

Adaptive Frontbeleuchtungssysteme werden durch die UNECE-Regelungen R 123 und R 149 je nach zugrundeliegender Lichtverteilung in zwei Kategorien eingeteilt. So werden adaptive Frontbeleuchtungssysteme, deren Basis die Abblendlichtverteilung darstellt, unter der Kategorie adaptive Abblendlichtsysteme geführt. Entsprechend sind adaptive Fernlichtsysteme (engl. Adaptive Driving Beam (ADB)) adaptive Frontbeleuchtungssysteme, welche auf einer Fernlichtverteilung beruhen. [160, 161]

2.3.1. Adaptive Abblendlichtfunktionen

Neben dem konventionellen Abblendlicht werden in der UNECE-Regelungen R 123 und R 149 weitere Abblendlichtfunktionen definiert. Die konventionelle Abblendlichtverteilung wird dabei als Klasse C („Landstraßenlicht“) bei allen Frontscheinwerfersystemen für Abblendlicht vorausgesetzt. Des Weiteren werden die Klasse E („Autobahnlicht“) für die Verwendung auf Autobahnen, Klasse V („Stadtlicht“) für die Verwendung im urbanen Verkehrsraum und Klasse W („Schlechtwetterlicht“) für die Verwendung bei schlechten Witterungsbedingungen definiert. Für die Bezeichnung als adaptives Abblendlichtsystem ist die Erfüllung der konventionellen Abblendlichtfunktion (Klasse C) und einer weiteren Abblendlichtklasse erforderlich. Zusätzlich zu den adaptiven Abblendlichtfunktionen wird auch das statische Abbiegelicht und dynamische Kurvenlicht zu den AFS-Funktionen gezählt. [160, 161]

In Abbildung 2.3 sind die verschiedenen adaptiven Abblendlichtfunktionen schematisch dargestellt.

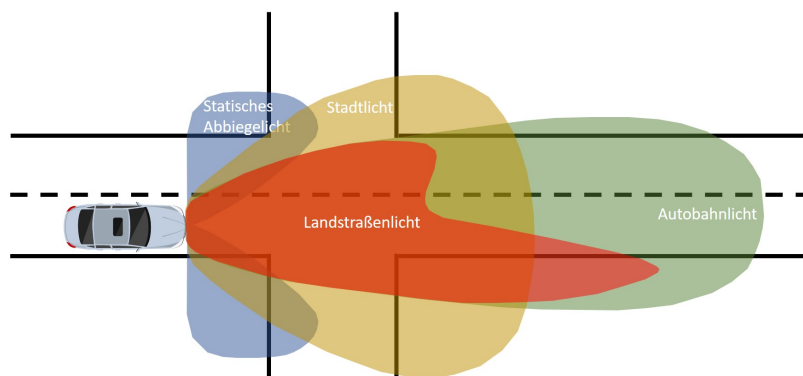


Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung der adaptiven Abblendlichtfunktionen.

Die in Abbildung 2.3 dargestellten adaptiven Abblendlichtfunktionen werden aufgrund ihres Verwendungszwecks unterschiedlich ausgelegt.

Das konventionelle Abblendlicht („Landstraßenlicht“, Klasse C) ist vorwiegend für die Nutzung auf Landstraßen ausgelegt. Die Lichtverteilung dieser Lichtfunktion stellt daher den Kompromiss zwischen eigener Sichtweite und der Minimierung der Blendgefahr für andere Verkehrsteilnehmer dar (siehe Abbildung 2.1). [135, 160, 161]

Beim „Autobahnlicht“ (Klasse E) wird die HDG der Lichtverteilung leicht angehoben, um auf Autobahnen mit höheren Fahrgeschwindigkeiten höhere Sichtweiten zu erreichen. [135, 160, 161]

Da im urbanen Verkehrsraum die Fahrgeschwindigkeit geringer ist als im außerstädtischen Bereich und zusätzlich die Straßen durch ortsfeste Beleuchtungssysteme beleuchtet werden, wird im urbanen Verkehrsraum eine deutlich geringere Sichtweite als auf Autobahnen benötigt. Zusätzlich treten im urbanen Verkehrsraum deutlich mehr Kreuzungen und Konfliktsituationen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern, wie Fußgängern oder Radfahrern auf, wodurch eine breitere Lichtverteilung benötigt wird, um diese frühzeitig detektieren zu können. Daher wird beim „Stadtlicht“ eine breitere Lichtverteilung mit niedrigerer HDG vorgesehen. [160, 161]

Das „Schlechtwetterlicht“ wird bei schlechten Witterungsbedingungen, wie Regen oder Schnee, eingesetzt um sowohl die eigenen Detektionsbedingungen zu bewahren als auch die Blendgefahr für andere Verkehrsteilnehmer nicht zu erhöhen. Sowohl das statische Abbiegelicht als auch das dynamische Kurvenlicht werden genutzt, um beim Abbiegevorgang in die Kurve hineinzuleuchten und so eine frühzeitige Detektion von Hindernissen zu ermöglichen. [135, 160, 161]

2.3.2. Adaptive Fernlichtfunktionen

Bei adaptiven Fernlichtfunktionen werden die Besonderheiten des konventionellen Abblend- und Fernlichts kombiniert. Das Ziel hierbei ist eine permanente Fernlichtfahrt im außerstädtischen Bereich zu ermöglichen und dabei die Blendgefahr auf Abblendlichtniveau zu halten [21, 69]. Die technische Realisierung eines blendfreien Fernlichts (engl. glare-free High Beam (gfHB)) kann dabei entweder über mechanische Blenden erfolgen, die zusätzlich zu der im konventionellen Abblendlicht bekannten HDG eine vertikale HDG erzeugen [69] oder über einzeln ansteuerbare LED-Segmente, die jeweils für einen Bereich der Fernlichtverteilung zuständig sind und einzeln ein- bzw. ausgeschaltet werden können, um bei permanenter Fernlichtfahrt andere Verkehrsteilnehmer auszublenden [21]. Dabei bietet die Verwendung von LED-Segmenten den Vorteil, dass bei mehreren auszublendenden Verkehrsteilnehmern je nach Größe und Auflösung der Segmente der Bereich zwischen zwei auszublendenden Verkehrsteilnehmern, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, ausgeleuchtet wird und somit bessere Detektionsbedingungen in diesem Bereich geschaffen werden [10, 21].

Audi A5 Coupé Matrix LED-Scheinwerfer

Funktionsprinzip
Audi A5 Coupé Matrix LED headlight
Operating principle
06/16

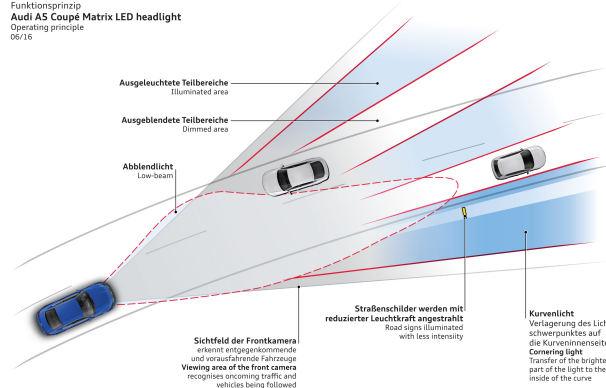


Abbildung 2.4.: Funktionsweise eines ADB-Systems mit LED Segmenten; die Verwendung von LED-Segmenten sorgt je nach Größe und Auflösung der Segmente für eine Vergrößerung des ausgeleuchteten Bereichs bei der Nutzung des blendfreien Fernlichts [10].

Bei technologieunabhängiger Betrachtung der in Abbildung 2.5 dargestellten ADB-Lichtverteilung sind wiederum die kombinierten Eigenschaften der Abblend- und Fernlichtverteilung zu erkennen. So ist in der Falschfarbendarstellung im oberen Abschnitt der Abbildung 2.5 die Trennung zwischen ausgeleuchtetem und ausgeblendetem Bereich deutlich zu sehen. Der auszublendende Bereich ist in der Position und Breite variabel. Diese Variabilität wird lediglich durch die Größe und Auflösung der Segmente begrenzt.

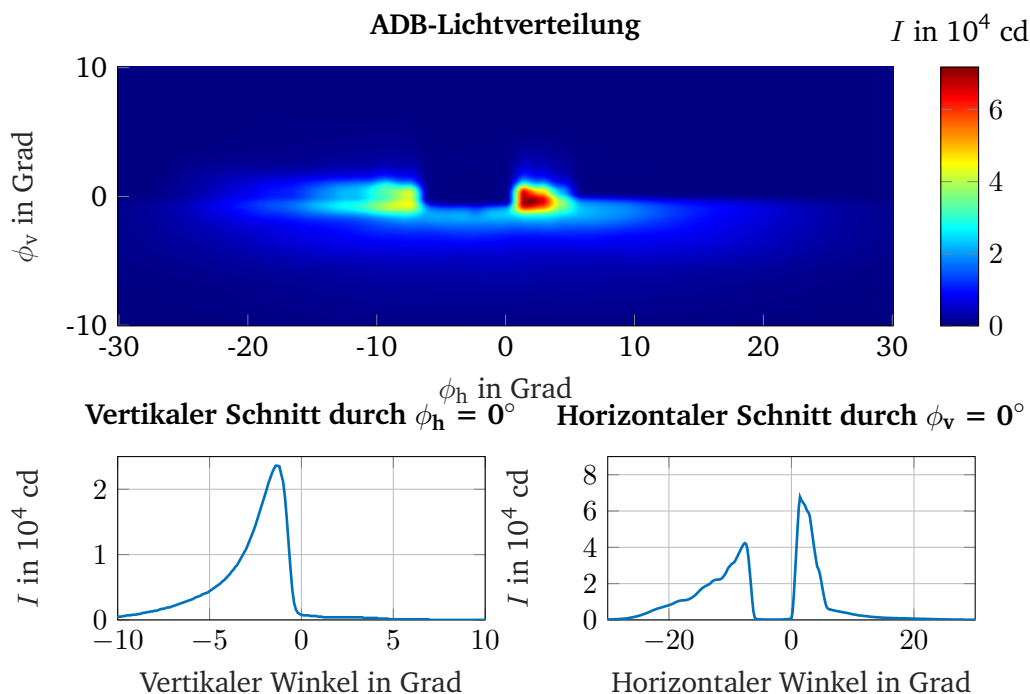


Abbildung 2.5.: Beispiel einer ADB-Lichtverteilung in Falschfarbendarstellung (oben); vertikaler Schnitt durch den horizontalen Winkel $\phi_h = 0^\circ$ (unten links), horizontaler Schnitt durch den vertikalen Winkel $\phi_v = 0^\circ$ (unten rechts).

Diese Möglichkeit der gezielten Ausleuchtung von Bereichen vor dem Fahrzeug sorgt dafür, dass im außerstädtischen Verkehrsraum keine Umschaltung zwischen der Abblendlichtverteilung und Fernlichtverteilung notwendig ist, da beide Lichtverteilungseigenschaften in der ADB-Lichtverteilung vertreten sind. Dies wird bei der Betrachtung der beiden Schnitte durch die Lichtverteilung deutlich (Abbildung 2.5 unten). Wird der vertikale Schnitt durch den horizontalen Winkel $\phi_h = 0^\circ$ betrachtet (Abbildung 2.5 unten links), so zeigt sich ein qualitativ gleicher Verlauf wie beim vertikalen Schnitt der Abblendlichtverteilung (Abbildung 2.1, unten links). Dies liegt daran, dass sich hier der auszublendende Bereich der Lichtverteilung befindet und somit in diesem Bereich die Abblendlichtverteilung allein aktiv ist.

Der horizontale Schnitt durch den vertikalen Winkel $\phi_v = 0^\circ$ (Abbildung 2.5 unten rechts) zeigt die Funktionsweise der ADB-Funktion in ihrem vollen Umfang. So folgt die Hüllkurve des Verlaufs qualitativ dem horizontalen Schnitt der Fernlichtverteilung in Abbildung 2.2 mit dem Unterschied, dass im auszublendenden Bereich die Lichtstärken auf das Abblendlichtniveau sinken und somit einer Erhöhung der Blendgefahr entgegengewirkt wird. Der restliche Bereich vor dem Fahrzeug wird jedoch mit deutlich höheren Lichtstärken in einem breiteren Bereich ausgeleuchtet, sodass die eigene Sichtweite nicht durch die Blendungsbegrenzung für andere Verkehrsteilnehmer eingeschränkt wird.

2.3.3. Hochauflösende Scheinwerfersysteme

In den letzten Jahren zeigt sich ein Trend zu hochauflösenden Systemen, bei denen die Segmente kleiner und mit einer höheren Auflösung realisiert werden [8, 9, 20, 34, 51, 60, 96, 101, 102]. Für die Realisierung dieser hochauflösten Scheinwerfersysteme kommen verschiedene Technologien wie Mikrospiegelarrays (engl. Digital Micromirror Device (DMD)) [83, 84, 106, 126, 180], Flüssigkristalldisplays (engl. Liquid Crystal Display (LCD)) [106, 126, 169, 180] oder Mikro-LED-Arrays zum Einsatz [51, 60, 102, 106, 126, 136, 154, 157, 180]. Die Anwendungsgebiete sind dabei vielfältiger als bei den bereits beschriebenen Systemen für das blendfreie Fernlicht. Die hochauflösenden Scheinwerfersysteme sind in der Lage, neben der blendfreien Fernlichtfunktion auch die HDG der Abblendlichtfunktion zu realisieren [8, 51, 86, 102, 111, 134].

Eine zusätzliche Funktionalität ist die Projektion von Symbolen auf die Fahrbahn, um so dem Fahrzeugführer Informationen zur Verfügung zu stellen. So ist, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, die Projektion der Breite des Fahrzeugs als sogenanntes „Baustellenlicht“ eine Möglichkeit dem Fahrer die Durchfahrt durch die engeren Fahrspuren einer Baustelle zu erleichtern. Weitere Projektionsbeispiele sind eine „Schneeflocke“ für glatte Fahrbahnen oder Navigationsinformationen.[20, 83, 84, 86, 96, 119, 122, 134, 136]



Abbildung 2.6.: Durch hochauflösende Scheinwerfersysteme realisierbare Fahrbahnprojektionen; das „Baustellenlicht“ (links) erleichtert dem Fahrzeugführer die Abschätzung der eigenen Fahrzeugbreite und somit die Baustelle zu durchfahren; weitere assistierende Projektionen sind die „Schneeflocke“ für glatte Fahrbahnen (mitte) oder Navigationsinformationen (rechts) [119].

3. Stand der Forschung

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit dem Stand der Forschung zu den wahrnehmungsphysiologischen Grundlagen des visuellen Systems, der Helligkeitswahrnehmung und der Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr. Aus den Erkenntnissen der Literaturstudie werden die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit abgeleitet.

3.1. Wahrnehmungsphysiologische Grundlagen des visuellen Systems

Die Sinneswahrnehmung des Menschen wird durch das logarithmische Weber-Fechner-Gesetz beschrieben, welches besagt, dass bei größeren Ausgangsreizstärken φ auch größere Reizstärkedifferenzen $\Delta\varphi$ nötig sind, um die gleiche Empfindungsgrößendifferenz $\Delta\Psi$ hervorzurufen [70, 76, 129, 138, 139]. Diese Beziehung wird exemplarisch in Abbildung 3.1 veranschaulicht.

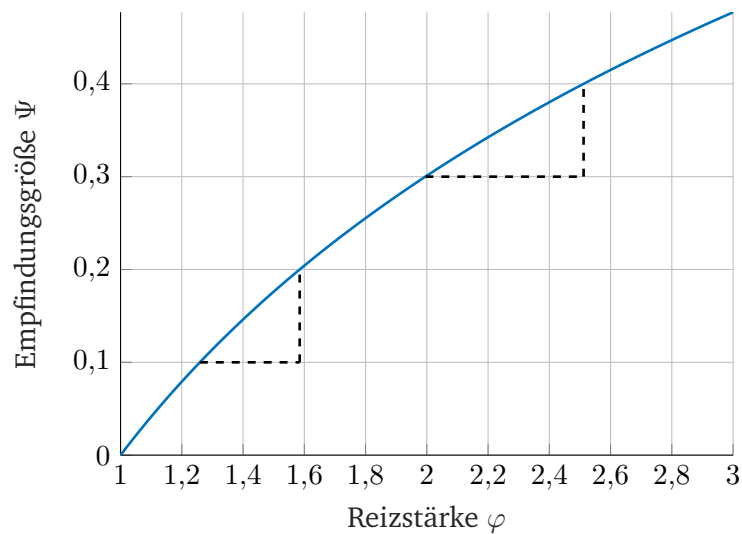


Abbildung 3.1.: Exemplarische Darstellung der psychophysikalischen Beziehung nach FECHNER [70]; je höher die Ausgangsreizstärke φ ist, desto höher ist die Reizstärkedifferenz $\Delta\varphi$ für die gleiche Empfindungsgrößendifferenz $\Delta\Psi$ zu wählen [70, 76, 129, 138, 139].

Die visuelle Wahrnehmung folgt ebenfalls dem Weber-Fechner-Gesetz. Dabei nimmt das visuelle System Leuchtdichten und Leuchtdichtedifferenzen wahr. Somit ist die Wahrnehmung von Leuchtdichtedifferenzen sowohl als relative Wahrnehmung als auch abhängig von der Ausgangsreizstärke zu betrachten [70, 76, 129, 138, 139]. Die Ausgangsreizstärke liegt nach DAMASKY [56] in einem Leuchtdichtebereich von $10^{-8} \text{ cd m}^{-2}$ bis 10^6 cd m^{-2} . Die Anpassung des visuellen Systems an die verschiedenen Leuchtdichteniveaus wird Adaptation genannt und durch verschiedene Mechanismen im visuellen System ermöglicht [77]. Zu diesen Mechanismen zählt die Anpassung des Pupillendurchmessers in einem Bereich von 2 mm bis 8 mm, welche wie eine Kamera-Blende für die Einstellung des auf die Netzhaut auftreffenden Lichtstroms sorgt [18, 76, 139]. Ein weiterer

Adaptationsmechanismus findet durch photochemische und neuronale Prozesse in der Netzhaut des Auges statt. Für diesen Adaptationsmechanismus sind die Rezeptoren in der Netzhaut, welche Stäbchen und Zapfen genannt werden, verantwortlich. Dadurch, dass Stäbchen und Zapfen bei unterschiedlichen Leuchtdichteniveaus aktiv sind, entstehen unterschiedliche Adaptationsbereiche für die visuelle Wahrnehmung, welche in Tabelle 3.1 aufgelistet sind. [18, 56, 75, 76, 139]

Tabelle 3.1.: Adaptationsbereiche und Ihre Eigenschaften [56, 75]

Bezeichnung	Leuchtdichtebereich in cd m^{-2}	Aktive Rezeptortypen
Skotopischer Bereich	10^{-8} bis 10^{-3}	Stäbchen
Mesopischer Bereich	10^{-3} bis 10^2	Stäbchen und Zapfen
Photopischer Bereich	10^2 bis 10^6	Zapfen

Aus Tabelle 3.1 wird deutlich, dass im skotopischen Bereich mit sehr geringen Adaptationsleuchtdichten ($L_A < 10^{-3} \text{ cd m}^{-2}$) die Stäbchen allein aktiv sind. Im photopischen Bereich mit hohen Adaptationsleuchtdichten ($L_A > 10^2 \text{ cd m}^{-2}$) sind dagegen die Zapfen aktiv. Im dazwischenliegenden mesopischen Bereich, welcher den für den nächtlichen Straßenverkehr relevanten Bereich darstellt, sind beide Rezeptortypen aktiv und tragen zum visuellen Wahrnehmungsprozess bei. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften von Stäbchen und Zapfen auf der Netzhaut hängt die Leistungsfähigkeit des visuellen Systems folglich von der Adaptationsleuchtdichte L_A ab. [76, 139]

Je Auge sind auf der Netzhaut etwa 6 Millionen Zapfen und etwa 120 Millionen Stäbchen vorhanden, welche, wie in Abbildung 3.2 gezeigt, unterschiedlich auf der Netzhaut verteilt sind. Die Zapfen, welche bei höheren Leuchtdichteniveaus aktiv sind, sind für das Farbsehen zuständig und weisen in der Fovea mit etwa 140.000 Rezeptoren pro mm^2 die höchste Dichte auf. Zusätzlich findet in der Fovea eine „Eins-zu-Eins“ Übertragung der Reizsignale statt. Im peripheren Gesichtsfeld, in welchem die Zapfendichte geringer ist, werden dagegen mehrere Zapfen für die Reizsignalübertragung zusammengeschaltet, sodass hier die Auflösung und damit die Schärfe der Abbildung deutlich geringer ausfällt. Die im Vergleich zu den Zapfen hellerempfindlicheren Stäbchen weisen die höchste Dichte außerhalb der Fovea auf und werden bei der Reizsignalübertragung ebenfalls zusammengeschaltet. Dies führt dazu, dass die Sehschärfe stark vom Adaptationszustand des visuellen Systems abhängig ist. [76, 80, 123, 139]

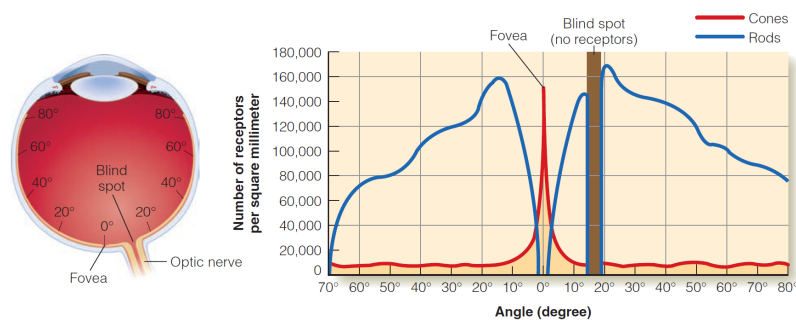


Abbildung 3.2.: Verteilung von Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut [80] nach OSTERBERG [123]; während die Zapfendichte, in rot dargestellt, in der Fovea am höchsten ist, sind in der Fovea keine Stäbchen vorhanden; die Stäbchendichte, in blau dargestellt, steigt im peripheren Bereich stark an; im „Blinden Fleck“ sind weder Stäbchen noch Zapfen vorhanden [76, 80, 123, 139].

Aufgrund der höheren Hellempfindlichkeit sind die Stäbchen auch bei geringeren Leuchtdichten im Gesichts-

feld in der Lage eine Sehaufgabe zu erfüllen, die sich auf die Wahrnehmung von Leuchtdichteunterschieden beschränkt. Die Adaptation, welche die Leistungsfähigkeit des visuellen Systems in Bezug auf Sehschärfe, Farbsehen und Hellempfindlichkeit bestimmt, erfolgt dabei für die Hell- und Dunkeladaptation unterschiedlich schnell. So ist die Helladaptation von geringen auf höhere Leuchtdichten innerhalb von wenigen Sekunden abgeschlossen, während die Dunkeladaptation etwa nach 30 bis 60 Minuten vollständig abgeschlossen ist. Wie in Abbildung 3.3 dargestellt, erfolgt die Dunkeladaptation in den ersten 7 bis 8 Minuten durch die Zapfen bis diese ihr Empfindlichkeitsmaximum erreichen und die Dunkeladaptation durch die Stäbchen fortgeführt wird. [76, 80, 89, 137, 139]

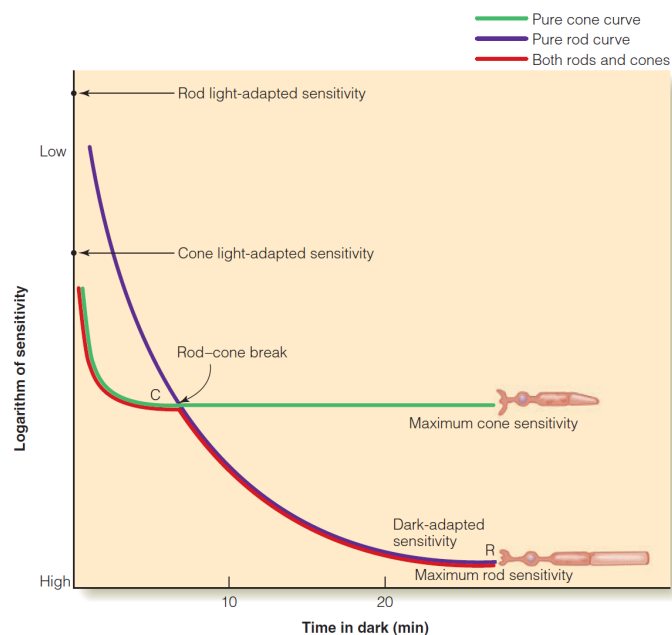


Abbildung 3.3.: Verlauf der Dunkeladaptation [80] nach RUSHTON [137]; zu Beginn folgt die Dunkeladaptation, in rot dargestellt, der in grün dargestellten Zapfenadaptation; sobald die Zapfen ihr Empfindlichkeitsmaximum erreicht haben, wird die Dunkeladaptation durch die Stäbchenadaptation, in blau dargestellt, bestimmt; der Übergangspunkt von Zapfen- zu Stäbchenadaptation wird „Kohlrausch-Knick“ genannt. [76, 80, 89, 137, 139]

3.2. Helligkeitswahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr

In diesem Abschnitt werden Forschungsarbeiten erörtert, welche den Einfluss der Fahrbahnelligkeit auf sicherheitsrelevante Parameter untersuchen. Dabei werden diese Forschungsarbeiten in Studien zu objektiven und subjektiven sicherheitsrelevanten Parametern unterteilt.

3.2.1. Studien zu objektiven sicherheitsrelevanten Parametern

Die Fahrbahnelligkeit im Fahrzeugvorfeld spielt eine essenzielle Rolle für die Sicherheit im Straßenverkehr. So zeigen verschiedene Studien, dass die nächtliche Unfallrate mit steigender Fahrbahnleuchtdichte sinkt [39, 73, 98, 124, 145, 153].

So zeigen Unfallstatistikanalysen von SCOTT [145] an etwa 100 Standorten, dass die Fahrbahnleuchtdichte und die Unfallrate eine Korrelation aufweisen, welche im Leuchtdichtebereich von $0,5 \text{ cd m}^{-2}$ bis 2 cd m^{-2}

besonders stark ausfällt. So sinkt die durchschnittliche Unfallrate in diesem Bereich um etwa 35 %, wenn die Fahrbahnleuchtdichte um 1 cd m^{-2} erhöht wird. [145]

Ähnliche Ergebnisse erzielen auch SULLIVAN und FLANNAGAN [153] durch die Analyse von Verkehrsunfallstatistiken in den USA. Hierzu analysieren sie die Unfallzahlen im Zeitraum von 1987 bis 1997 und betrachten dabei verschiedene Szenarien, wie tödliche Fußgängerunfälle an Kreuzungen, tödliche Fußgängerunfälle auf unbeleuchteten Landstraßen und tödliche Unfälle mit einem Fahrzeug auf unbeleuchteten, kurvenreichen Straßen. Der betrachtete Zeitraum erstreckt sich dabei von 9 Wochen vor bis 9 Wochen nach der Umstellung von Sommer- auf Winterzeit und umgekehrt. Somit wird ein Zeitraum betrachtet, bei dem die Verkehrsdichte weitgehend konstant ist, jedoch die Umgebungslichtbedingungen sich deutlich voneinander unterscheiden. Die in Abbildung 3.4 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei dunklen Umgebungsbedingungen sowohl im Frühjahr (Abbildung 3.4 links) als auch im Herbst (Abbildung 3.4 rechts) die Zahl der tödlichen Unfälle im Vergleich zu hellen Umgebungsbedingungen um einen Faktor von etwa 3 bis 6,75 ansteigt. [153]

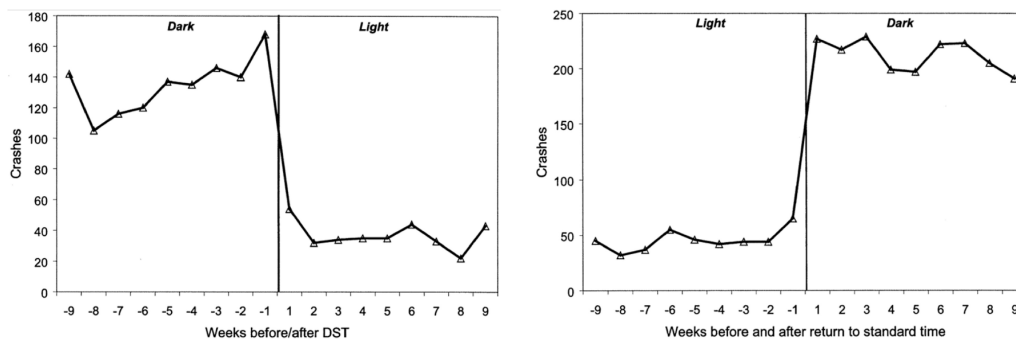


Abbildung 3.4.: Einfluss der Umgebungslichtbedingungen auf die Unfallzahlen in den USA von 1987 bis 1997; sowohl im Frühjahr (links) als auch im Herbst (rechts) sind bei dunklen Umgebungslichtbedingungen deutlich mehr Unfälle zu verzeichnen als zur gleichen Zeit bei hellen Umgebungslichtbedingungen [153].

Eine ähnliche Betrachtung der Unfallstatistiken von FORIUS et al. [73] in Großbritannien zeigt, dass die Zahl der Unfälle bei dunklen Umgebungslichtbedingungen um etwa 30 % höher ist als bei hellen Umgebungslichtbedingungen. Um die Verkehrsdichte annähernd konstant zu halten, wird auch in dieser Studie der Zeitraum um die Zeitumstellung im Frühjahr und im Herbst betrachtet. [73]

Analysen der Unfallzahlen in Kreuzungen vor und nach der Einführung von Beleuchtungsmaßnahmen von OYA et al. [124] zeigen ebenfalls, dass heller beleuchtete Kreuzungen zur Reduktion der Unfallzahlen beitragen. So wird auf Kreuzungen, die nach der Beleuchtungsmaßnahme eine durchschnittliche Fahrbahnbeleuchtungsstärke von 20 lx aufweisen, ein Rückgang der nächtlichen Unfallzahlen beobachtet. Bei durchschnittlichen Fahrbahnbeleuchtungsstärken von 30 lx und höher wird im Vorher-Nachher-Vergleich sogar ein signifikanter Rückgang der nächtlichen Unfallzahlen festgestellt. Daher empfehlen OYA et al. die Fahrbahnbeleuchtungsstärke auf über 30 lx anzuheben. [124]

Neben der Analyse von Unfallstatistiken in beleuchteten und unbeleuchteten Straßenkreuzungen im US-Bundesstaat Minnesota verfolgen BULLOUGH et al. [39] einen analytischen Ansatz, um die visuelle Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der vorhandenen Straßenbeleuchtungseinrichtungen auf den im statistischen Teil betrachteten Straßen zu ermitteln. Hierfür wird das Relative Visual Performance (RVP)-Modell herangezogen, welches von REA und OUELLETTE entwickelt wurde, um die relative visuelle Leistungsfähigkeit des Menschen

in Abhängigkeit der Umfeldleuchtdichte und des vorhandenen Kontrastes zu beschreiben [131–133]. Die statistische Analyse ergibt eine um 12 % niedrigere nächtliche Unfallhäufigkeit für beleuchtete Kreuzungen im Vergleich zu unbeleuchteten Kreuzungen. Der analytische Ansatz zeigt, dass die visuelle Leistungsfähigkeit mit den statistischen Ergebnissen übereinstimmt und somit das RVP-Modell als Hilfswerkzeug für die Auslegung von Straßenbeleuchtungssystemen anwendbar ist. [39]

Das Ziel der Studie von JACKETT und FRITH [97, 98] ist die Quantifizierung der Auswirkungen von Straßenbeleuchtung auf die Verkehrssicherheit. Hierfür analysieren sie Verkehrsunfälle mit verschiedenen Charakteristiken, wie Unfälle auf nassen Fahrbahnen, Unfälle auf trockenen Fahrbahnen, Unfälle in kleinen und großen Kreuzungen oder schwerwiegende Unfälle in der Straßenmitte. Des Weiteren werden verschiedene unabhängige Variablen auf Korrelation mit den Unfallzahlen geprüft. Diese unabhängigen Variablen sind die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} , die durch Blendung erzeugte Schwellwerterhöhung TI , die Gesamtgleichmäßigkeit U_0 , die Längsgleichmäßigkeit U_1 und die Lichtfarbe. Die Analyse der Unfalldaten zeigt, dass die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} die höchste Korrelation mit den Unfalldaten zeigt. Wie in Abbildung 3.5 dargestellt, sinkt das Nacht-zu-Tag-Unfallverhältnis mit steigender durchschnittlicher Fahrbahnleuchtdichte. [97, 98]

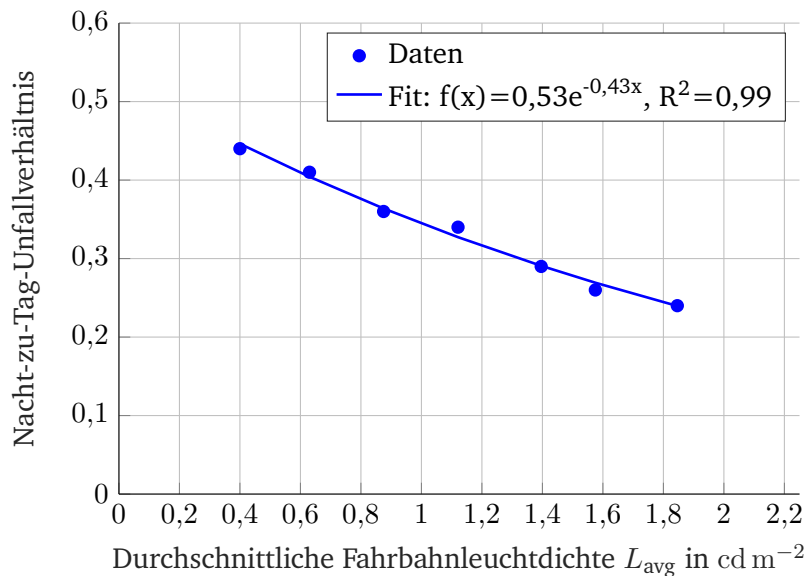


Abbildung 3.5.: Verlauf des Nacht-zu-Tag-Unfallverhältnisses in Abhängigkeit der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte nach JACKETT und FRITH; je höher die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte, desto geringer das Nacht-zu-Tag-Unfallverhältnis [97, 98].

Dieser Verlauf ist bei allen betrachteten Unfallcharakteristiken zu beobachten. So wird das Nacht-zu-Tag-Unfallverhältnis durch die Erhöhung der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte um $0,5 \text{ cd m}^{-2}$ um etwa 15 % für nasse Fahrbahnen und etwa 56 % im Falle von Fußgängerunfällen in der Straßenmitte gesenkt. [97, 98]

Auch die Analysen der Unfallzahlen in Großbritannien und Griechenland zwischen 1995 und 2004 durch PLAINIS et al. [128] zeigen, dass die Umgebungslichtbedingungen einen erheblichen Einfluss auf das Unfallgeschehen haben. Anhand der britischen Unfalldaten, welche in Abbildung 3.6 dargestellt sind, ist zu erkennen, dass der Schweregrad der Verletzung, welche PLAINIS et al. als Anzahl der tödlichen Unfälle je 100 Kollisionen definieren, bei allen betrachteten Straßentypen (Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen) am Tag um

einen Faktor von bis zu 2,5 niedriger ist als in der Nacht. Werden die Nachtunfälle in Unfälle auf Straßen mit und ohne Straßenbeleuchtung unterteilt, ist festzustellen, dass hier die helleren Umgebungslichtbedingungen aufgrund der vorhandenen Straßenbeleuchtung den Schweregrad der Verletzung im Vergleich zu den unbeleuchteten Straßen um einen Faktor von bis zu 2,8 senken. [128]

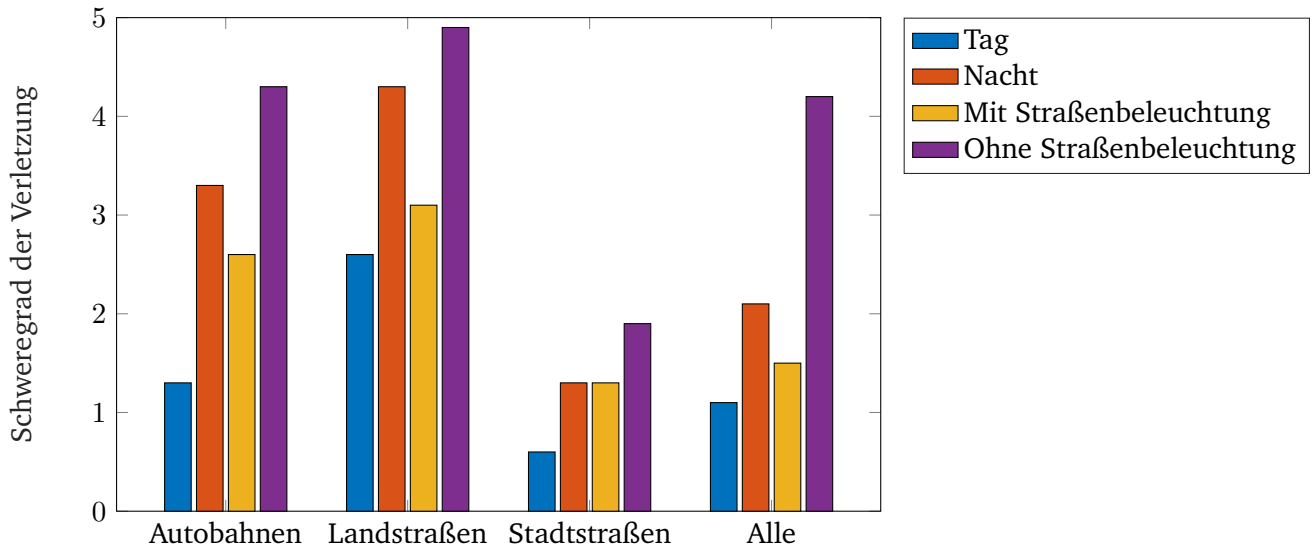


Abbildung 3.6.: Schweregrad von Verletzungen bei Unfällen auf verschiedenen Straßentypen und bei verschiedenen Umgebungslichtbedingungen; der Schweregrad der Verletzungen ist am Tag (blaue Balken) für alle Straßentypen geringer als in der Nacht (rote Balken); dieses Verhalten ist auch bei Nachtunfällen zu beobachten, wobei der Schweregrad der Verletzungen auf beleuchteten Straßen (gelbe Balken) geringer ausfällt als auf unbeleuchteten Straßen (lila Balken) [128].

Durch die Analyse von niederländischen Unfallstatistiken von 1987 bis 2006 bestätigt WANVIK [177] den positiven Einfluss von Straßenbeleuchtungssystemen auf die nächtlichen Unfallzahlen. So ist durch geeignete Straßenbeleuchtung eine Reduktion der nächtlichen Unfälle mit Verletzten um etwa 50 % erreichbar. [177]

Neben der Analyse des nächtlichen Unfallgeschehens stellt die Betrachtung objektiver Wahrnehmungsparameter eine weitere Methodik zur Bestimmung des Einflusses der Fahrbahnelligkeit auf die nächtliche Verkehrssicherheit dar. So untersucht DAMASKY [56] im Hinblick auf die frühzeitige Detektion von Hindernissen den benötigten Weberkontrast K_W [70, 110, 179] in Abhängigkeit von der Fahrbahnleuchtdichte, die in einem Abstand von 35 m vor dem Fahrzeug bestimmt wird. Der Weberkontrast K_W wird dabei nach Gleichung 3.1 berechnet.

$$K_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} \quad (3.1)$$

Dabei beschreibt L_O die Objekteleuchtdichte und L_U die Umfeldleuchtdichte. Anhand der Untersuchungsergebnisse, welche in Abbildung 3.7 zu sehen sind, wird deutlich, dass der benötigte Weberkontrast mit steigender Fahrbahnleuchtdichte abnimmt. Somit werden die Detektionsbedingungen für den Fahrzeugführer durch eine hellere Ausleuchtung der Fahrbahn verbessert und eine Objektdetektion schon bei geringeren Weberkontrasten ermöglicht. [56]

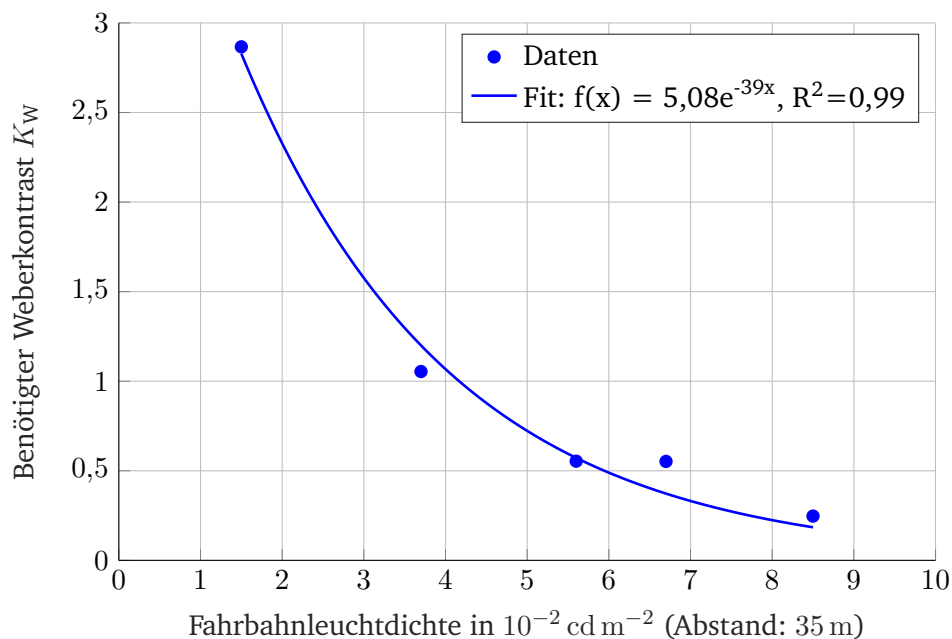


Abbildung 3.7.: Verlauf des benötigten Weberkontrastes K_W in Abhängigkeit der Fahrbahnleuchtdichte nach DAMASKY; bei ansteigender Fahrbahnleuchtdichte im Fahrzeugvorfeld in 35 m Entfernung nimmt der benötigte Weberkontrast K_W exponentiell ab [56].

Diese Ergebnisse werden durch Untersuchungen von SCHMIDT-CLAUSEN und FREIDING [141] bestätigt. Die durchgeführten Untersuchungen, an denen insgesamt 1.701 Versuchspersonen teilgenommen haben, verfolgen das Ziel den Einfluss der Fahrbahnleuchtdichte auf die Kontrastwahrnehmung und die Sehschärfe zu ermitteln. Dabei stellt sich heraus, dass eine Erhöhung der Fahrbahnleuchtdichte sowohl auf die Kontrastwahrnehmung als auch auf die Sehschärfe der Versuchspersonen einen positiven Effekt ausübt und damit die Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr erhöht. [141]

FOTIOS und CHEAL [72] betrachten den Einfluss der Fahrbahnelligkeit auf die Objektdetektion aus der Sicht von Fußgängern und verwenden eine Apparatur, welche eine Straßenszenarie simuliert, um die Studie mit vier Versuchspersonen durchzuführen. Dabei betrachten sie Straßenbeleuchtungsstärken von 0,2 lx bis 20 lx auf einer Fläche, die 1.080 mm lang und 1.200 mm breit ist. Die verwendeten Objektgrößen variieren in einem Bereich von 0,40 mm bis 6,31 mm. Die Ergebnisse zeigen, dass bei größeren Beleuchtungsstärken die detektierbare Objektgröße aufgrund der verbesserten Kontrastwahrnehmung und Sehschärfe kleiner wird. So wird für ein 25 mm großes Objekt eine Straßenbeleuchtungsstärke von 1,8 lx benötigt, um es in einer Entfernung von 6 m mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % detektieren zu können. Des Weiteren schlagen FOTIOS und CHEAL einen Beleuchtungsstärkewert von 5,7 lx als angemessene Beleuchtungsstärke vor. [72]

PLAINIS und MURRAY [127] untersuchen mit drei Versuchspersonen den Verlauf der Reaktionszeit in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte L_A und stellen fest, dass bei höheren Adaptationsleuchtdichten die Reaktionszeit der Versuchspersonen sich verringert. [127] Somit wird sowohl die Detektion von Hindernissen als auch die Einleitung einer geeigneten Reaktion durch verbesserte Umgebungslichtbedingungen positiv beeinflusst.

Inwieweit die Fahrbahnelligkeit einen Einfluss auf die Blickverteilung von Fahrzeugführern hat und somit die vorausschauende Fahrweise beeinflusst, wurde ebenfalls in einigen Studien betrachtet [32, 33, 46, 49, 50,

52, 57, 66, 78, 81, 82, 105].

Die zur Blickverteilung des Fahrzeugführers durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass neben der Fahrerfahrung die Umgebungslichtbedingungen am Tag und in der Nacht die Blickverteilung wesentlich beeinflussen [32, 33, 49, 50, 78, 105].

In einer Studie von KOBBERT [105] fahren 54 Versuchspersonen einen Rundkurs von etwa 103 km Länge einmal am Tag und einmal bei Nacht ab. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Median der Blickverteilung bei Nacht deutlich näher am Fahrzeug liegt als bei Tag. So beträgt der Unterschied zwischen dem Median der Blickverteilung in der Nacht (etwa 33,5 m vor dem Fahrzeug) und dem Median der Blickverteilung am Tag (etwa 88,9 m vor dem Fahrzeug) mehr als 50 m. Des Weiteren stellt KOBBERT fest, dass die Blickverteilung in der Stadt im Vergleich zu Autobahnen und Landstraßen deutlich stärker streut. [105] Die größere Streuung der Blickverteilung in der Stadt wird durch Untersuchungen von BRÜCKMANN et al. und DIEM ebenfalls festgestellt. [32, 66]

Untersuchungen von DAMASKY und HOSEMANN [57] und BRÜCKMANN et al. [33] zeigen, dass neben den Umgebungslichtbedingungen auch die Scheinwerferlichtverteilungen die Blickverteilung in der Nacht beeinflussen. Hierfür vergleichen DAMASKY und HOSEMANN die Blickverteilung von Fahrzeugführern bei H4- und H7-Halogencheinwerfern und Xenon-Scheinwerfern. Die Studienergebnisse zeigen, dass die engere Vorfeldausleuchtung des verwendeten H4-Halogencheinwerfers zu einer Blickverteilung führen, die näher am Fahrzeug ihren Schwerpunkt aufweist als bei Verwendung eines Xenon-Scheinwerfers, welcher den Schwerpunkt der Blickverteilung näher in den Bereich der Hell-Dunkel-Grenze (HDG) schiebt und somit zu Blickfixationen in größeren Entfernungen führt, welche die frühzeitige Detektion von Hindernissen begünstigt. [57]

BRÜCKMANN et al. stellen in einer vergleichbaren Untersuchung mit fünf verschiedenen Systemen und fünf Versuchspersonen fest, dass Halogensysteme eher schmale Blickverteilungen erzeugen, wohingegen Xenonsysteme eher breitere Blickverteilungen zur Folge haben. [33]

3.2.2. Studien zu subjektiven sicherheitsrelevanten Parametern

Die Fahrbahnelligkeit beeinflusst zusätzlich zu den objektiv messbaren Parametern zur Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr auch die subjektiv wahrgenommene Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr. Dieser Einfluss ist ebenfalls Gegenstand vorheriger Untersuchungen, welche nachfolgend erörtert werden.

So führt eine Erhöhung des Helligkeitsniveaus nach HAMM und FRIEDRICH [87] zu einer deutlich geringeren Müdigkeit und Anstrengung beim Führen eines Kraftfahrzeugs. In einer zusätzlichen Befragung von Versuchspersonen werden Scheinwerfer mit adaptiven Lichtsystemen wie Abbiegelicht, Kurvenlicht und Autobahnlicht sowohl für die Sicherheit als auch den Komfort beim Fahren besser bewertet als Standard-Halogencheinwerfer. [87]

Untersuchungen von SCHREUDER [144] zeigen ebenfalls, dass Fahrzeugführer eine durch stationäre Beleuchtungssysteme erzeugte Helligkeitserhöhung allgemein als zufriedenstellend und angenehmer empfinden als Situationen im Straßenverkehr, in denen solche ortsfesten Beleuchtungssysteme fehlen. [144]

SETYANINGSIH et al. [146] erzielen in einer Studie auf zwei indonesischen Autobahnen ähnliche Resultate. So geben die Versuchspersonen, welche aufgenommene Videodaten anhand ihres subjektiven Sicherheitsgefühls und der Erkennbarkeit von Verkehrszeichen und Fahrbahnmarkierungen bewerten, an, dass die ortsfeste Straßenbeleuchtung einen positiven Effekt auf das subjektive Sicherheitsgefühl hat. [146]

KLEINKES [103] untersucht in kontrollierten Laborbedingungen die Lichtverteilungen von insgesamt 21 Scheinwerferpaaren (13 Halogencheinwerfer, acht Xenon-Scheinwerfer) auf verschiedene Gütemerkmale wie

Homogenität, Helligkeit und Detektionsbedingungen. Dabei stellt KLEINKES anhand der Bewertungen von 124 Versuchspersonen fest, dass für die Homogenitätsbewertung der Bereich von 3 m bis 18 m vor dem Fahrzeug relevant ist. Des Weiteren zeigen die erzielten Ergebnisse, dass die Fahrbahnelligkeit mit dem subjektiven Sicherheitsgefühl und dem empfundenen Fahrkomfort der Versuchspersonen korreliert. Aufbauend auf diesen Ergebnissen schlägt KLEINKES eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte von 1 cd m^{-2} vor. [103, 171] In einer Studie mit jungen Fahrzeugführern (Durchschnittsalter 21 Jahre) stellen WAGNER und KHANH [174] fest, dass eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte von 0,5 bis $0,6 \text{ cd m}^{-2}$ benötigt wird, um ein adäquates Sicherheitsgefühl herbeizuführen.

Da die ortsfeste Straßenbeleuchtung im urbanen Verkehrsraum die Umgebungslichtbedingungen für alle Verkehrsteilnehmer bereitstellt, werden nachfolgend Untersuchungen betrachtet, die auf den Einfluss der Straßenbeleuchtung auf das Sicherheitsempfinden von Fußgängern eingehen [25, 27, 28, 72, 85, 116, 125].

So zeigen zwei Studien mit insgesamt 155 Versuchspersonen von LOEWEN et al. [116], dass die Umgebungslichtbedingungen eine signifikante Rolle für das subjektive Sicherheitsgefühl in der Nacht spielen. Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass die Umgebungslichtbedingungen bei der wahrgenommenen Sicherheit in Bezug auf Kriminalität in der Stadt als wichtigstes Merkmal angesehen und hellere Umgebungslichtbedingungen für ein erhöhtes Sicherheitsgefühl bevorzugt werden. [116]

Die Korrelation der Umgebungslichtbedingungen und dem subjektiven Sicherheitsempfinden wird von BOYCE et al. [28] bestätigt. So ermitteln BOYCE et al. in vier separaten Studien mit insgesamt 68 Versuchspersonen in New York City und Albany eine Fahrbahnbeleuchtungsstärke von 30 lx als angemessene Beleuchtungsstärke für ein adäquates Sicherheitsgefühl bei Fußgängern [28].

FOTIOS et al. [74] ermitteln eine optimale Beleuchtungsstärke von 10 lx für ein erhöhtes Sicherheitsgefühl, wenn die Beleuchtung auf Fußgänger und ihre Umgebung ausgerichtet ist.

Frühere Studien von SIMONS et al. [148] oder DE BOER [58] schlagen Fahrbahnbeleuchtungsstärken von 5 lx bzw. $5,7 \text{ lx}$ (Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} : $0,4 \text{ cd m}^{-2}$) vor, um einen adäquaten Gesamteindruck der Beleuchtung bei Fußgängern zu erzeugen.

Untersuchungen mit insgesamt 88 Versuchspersonen (27 männlich, 61 weiblich) von BOOMSMA und STEG [27] und insgesamt 275 Versuchspersonen von PEÑA-GARCÍA et al. zeigen ebenfalls, dass höhere Straßenbeleuchtungsniveaus die subjektiv wahrgenommene Sicherheit erhöhen [27, 125]. Zusätzlich schließen PEÑA-GARCÍA et al. aus ihren Ergebnissen, dass warmweiße Straßenbeleuchtungssysteme zu einem höheren Sicherheitsgefühl führen als kaltweiße Systeme [125].

Eine Studie von BLÖBAUM und HUNECKE [25] mit 122 Versuchspersonen gibt an, dass die Umgebungslichtbedingungen vor allem in Situationen mit einem geringen Risikopotential für die frühzeitige Erkennung von möglichen Gefahren relevant ist [25].

HAANS und DE KORT [85] betrachten verschiedene Lichtverteilungen von Straßenbeleuchtungssystemen und Ansteuerungsmöglichkeiten, um ihren Einfluss auf das Sicherheitsempfinden von Fußgängern zu untersuchen. Hierzu wird sowohl eine statische Untersuchung als auch eine dynamische Untersuchung durchgeführt. Insgesamt nehmen an der Studie 29 Frauen im Alter von 19 bis 30 Jahren teil. Die Aufgabe der Versuchspersonen besteht darin, die Beleuchtung einer Teststraße zu bewerten, welche durch unterschiedliche Ansteuerung der einzelnen Straßenbeleuchtungssysteme in ihrer Lichtverteilung variabel gestaltet wird. In der statischen Untersuchung werden dabei folgende drei Fälle betrachtet (siehe Abbildung 3.8 links). Im ersten Fall (Abbildung 3.8 links, A) werden die Straßenbeleuchtungssysteme so angesteuert, dass sie die gleiche Beleuchtungsstärke auf der Straße erzeugen. Im zweiten Fall (Abbildung 3.8 links, B) werden die Straßenbeleuchtungssysteme so angesteuert, dass ein aufsteigender Beleuchtungsstärkeverlauf über die Entfernung zu beobachten ist.

Die umgekehrte Ansteuerung der Straßenbeleuchtungssysteme für einen mit der Entfernung absteigenden Beleuchtungsstärkeverlauf auf der Straße bildet den dritten Fall in der statischen Untersuchung (Abbildung 3.8 links, C). Die Ergebnisse der statischen Untersuchung zeigen, dass die Versuchspersonen den absteigenden Beleuchtungsstärkeverlauf im Vergleich zum ansteigenden Beleuchtungsstärkeverlauf bevorzugen und somit mehr Licht in ihrer unmittelbaren Umgebung wünschen.

Um die erhaltenen Ergebnisse aus der statischen Untersuchung zu validieren, führen HAANS und DE KORT zusätzlich eine dynamische Untersuchung mit 50 gehenden Versuchspersonen im Alter von 18 bis 27 Jahren durch (28 männlich, 22 weiblich). Diesmal werden drei verschiedene dynamische Ansteuerungsmöglichkeiten der Straßenbeleuchtung betrachtet (siehe Abbildung 3.8 rechts). Die erste Ansteuerungsmöglichkeit sieht dabei vor, dass die beiden Straßenbeleuchtungssysteme in unmittelbarer Nähe der Versuchsperson und ein zusätzliches Straßenbeleuchtungssystem in Laufrichtung der Versuchsperson die Straße beleuchten (Abbildung 3.8 rechts, A). Im zweiten Fall werden die Straßenbeleuchtungssysteme so angesteuert, dass die Versuchsperson sich in einem „dunklen Loch“ auf der Straße befindet und der Bereich vor und hinter der Versuchsperson heller ausgeleuchtet wird (Abbildung 3.8 rechts, B). Den letzten Fall bildet erneut die umgekehrte Ansteuerung der Straßenbeleuchtungssysteme. Somit befindet sich die Versuchsperson in einem hellen Bereich auf einer sonst dunklen Straße (Abbildung 3.8 rechts, C). Die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen zeigen erneut, dass die Straßenbeleuchtung signifikant besser bewertet wird, wenn sie die unmittelbare Umgebung der Fußgänger heller ausleuchtet. [85]

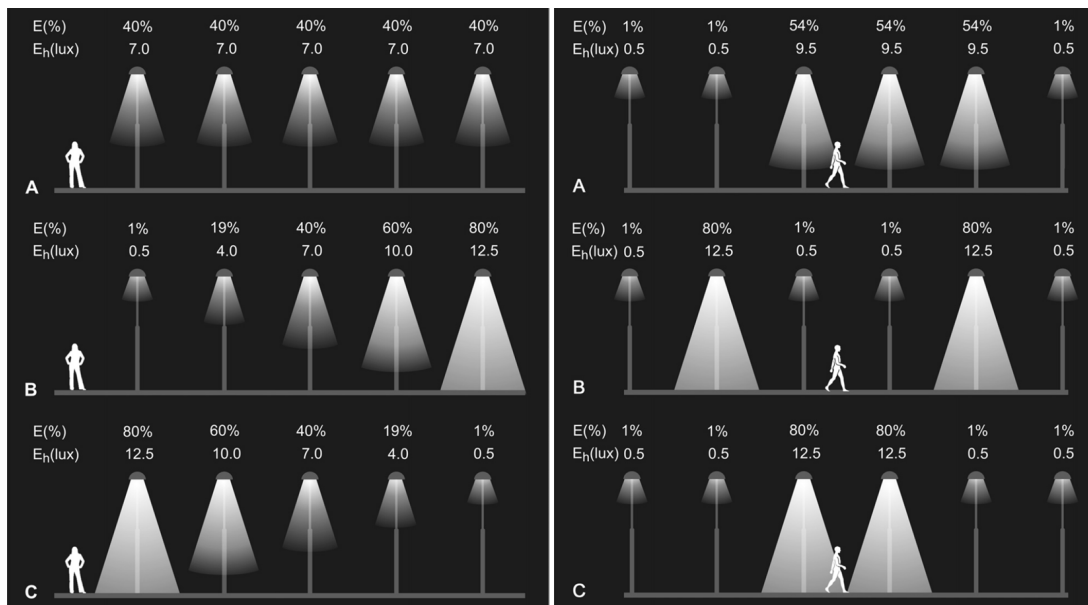


Abbildung 3.8.: Betrachtete Beleuchtungsszenarien für die statische (links) und dynamische (rechts) Untersuchung von HAANS und DE KORT; statische Untersuchung (links): Gleiche Ansteuerung der Straßenbeleuchtungssysteme (A), aufsteigender Beleuchtungsstärkeverlauf (B), absteigender Beleuchtungsstärkeverlauf (C); dynamische Untersuchung (rechts): Straßenbeleuchtung erhellt unmittelbare Umgebung und Laufweg der Versuchsperson (A), Ansteuerung der Straßenbeleuchtung erzeugt „dunkles Loch“ in unmittelbarer Nähe der Versuchsperson (B), Ansteuerung der Straßenbeleuchtung erzeugt „hellen Bereich“ in unmittelbarer Nähe der Versuchsperson (C). [85]

3.3. Detektion im nächtlichen Straßenverkehr

Einen wesentlichen Beitrag zur Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr leisten neben der Fahrbahnelligkeit die Detektionsbedingungen für den Fahrzeugführer. Die Detektion beschreibt dabei die visuelle Wahrnehmung von Leuchtdichteunterschieden im Gesichtsfeld. Der kleinste wahrnehmbare Leuchtdichteunterschied zwischen einem Sehzeichen („Objekt“) und seinem Umfeld wird Detektionsschwelle genannt. Dabei erfolgt die quantitative Beschreibung der Detektionsbedingungen durch verschiedene Kontrastdefinitionen. Die Definition des Weberkontrasts K_W , welcher das Verhältnis der Leuchtdichtedifferenz ΔL zwischen Objektleuchtdichte L_O und Umfeldleuchtdichte L_U zur Umfeldleuchtdichte L_U beschreibt (siehe Gleichung 3.1), ist für den nächtlichen Straßenverkehr von besonderer Relevanz. Aufgrund des großen Leuchtdichtebereichs, der sowohl für das Objekt als auch das Umfeld nutzbar ist, sind zwei Kontrastpolaritäten realisierbar, welche in Abbildung 3.9 dargestellt sind. So beschreibt der Positivkontrast eine Situation, bei der das Objekt heller als sein Umfeld erscheint ($L_O > L_U$). Erscheint das Objekt dunkler als sein Umfeld ($L_O < L_U$), wird von Negativkontrast gesprochen. [18]

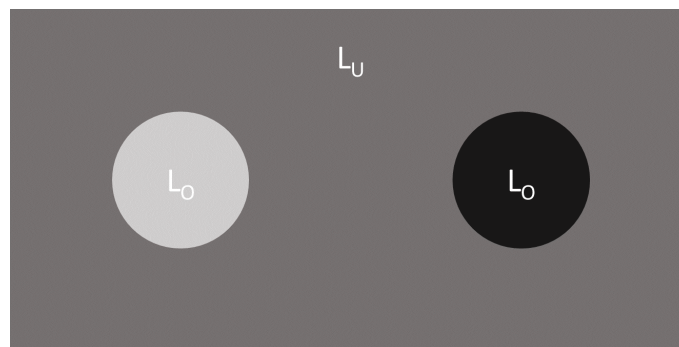


Abbildung 3.9.: Kontrastpolaritäten; links: Das Objekt erscheint heller als sein Umfeld (Positivkontrast), rechts: Das Objekt erscheint dunkler als sein Umfeld (Negativkontrast). [18]

Aufgrund der Eigenschaften des visuellen Systems, welche in Abschnitt 3.1 dargelegt werden, ist die Objektdetektion von verschiedenen Parametern abhängig. So beeinflussen neben der Kontrastpolarität die Adaptationsleuchtdichte, die Objektgröße, die Darbietungsdauer und das Alter des Beobachters die Objektdetektion. [1, 2, 4–6, 11–15, 23, 56]

Die in Abschnitt 3.2 gezeigten Studien zur Auswirkung der Fahrbahnelligkeit zeigen, dass eine Erhöhung der Fahrbahnleuchtdichte einen positiven Einfluss auf die Zahl der nächtlichen Verkehrsunfälle hat [39, 73, 97, 98, 124, 128, 145, 153, 177]. Dieser Zusammenhang lässt sich durch die verbesserten Detektionsbedingungen und damit verbunden die verbesserte Sehleistung erklären, welche in verschiedenen Untersuchungen bestätigt wird [1, 7, 12, 23, 56, 113].

BLACKWELL [23] führt im Jahr 1946 eine der umfassendsten Studien zu Schwellenkontrasten durch. Für die Durchführung der Studie mit weiblichen Versuchspersonen im Alter von 19 bis 26 Jahren wird eine lange weiß gestrichene Halle verwendet, die eine Einstellung der Adaptationsleuchtdichte L_A in einem Bereich von 0 cd m^{-2} bis etwa 342 cd m^{-2} ermöglicht. Der Durchmesser der zu detektierenden kreisrunden Sehzeichen wird in einem Winkelbereich von $121'$ bis $3,6'$ variiert. Für die Berechnung der Kontraste bei den jeweiligen Einstellungen und deren Kombinationen wird der Weberkontrast verwendet, wobei BLACKWELL für den Fall, dass das Objekt dunkler als das Umfeld erscheint die Objekt- und Umfeldleuchtdichte im Zähler von Gleichung 3.1 vertauscht, um für alle Konstellationen positive Werte für den Kontrast zu erhalten. Die Ergebnisse der Studie

zeigen, dass sowohl mit steigender Adaptationsleuchtdichte als auch mit steigender Sehzeichengröße der notwendige Detektionsschwellkontrast sinkt. Der hier bestimmte Detektionsschwellkontrast beschreibt dabei die 50 %-Schwelle. Das bedeutet, dass bei diesem Kontrast die Hälfte der Versuchspersonen das Sehzeichen detektieren und die andere Hälfte bei gleichem Kontrast nicht in der Lage ist, das Sehzeichen zu detektieren. [23]

Bestätigt werden die Ergebnisse von BLACKWELL durch Untersuchungen von AULHORN [12, 14]. So zeigt AULHORN, dass die Kontrastwahrnehmung mit steigender Adaptationsleuchtdichte und steigender Objektgröße verbessert wird. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Sehschärfe ebenfalls mit der Adaptationsleuchtdichte korreliert und mit steigender Adaptationsleuchtdichte verbessert wird. [12, 14]

Ebenfalls werden die Erkenntnisse durch ELOHOLMA et al. [68] bestätigt, indem in Laborstudien der Einfluss der Umfeldleuchtdichte L_U und des Spektrums der Lichtquelle auf die Kontrastschwelle und die Reaktionszeit der Versuchspersonen untersucht wird. Dabei stellen ELOHOLMA et al. fest, dass geringere Umfeldleuchtdichten sowohl die Kontrastschwelle als auch die Reaktionszeit negativ beeinflussen. Des Weiteren ist bei geringen mesopischen Leuchtdichten die Kontrastschwelle und die Reaktionszeit bei kürzeren Wellenlängen geringer als bei längeren Wellenlängen. Dieser Effekt wird durch den Purkinje-Effekt beschrieben. [68]

Um den Einfluss verschiedener Adaptationsbedingungen auf die Kontrastwahrnehmung zu untersuchen, führt DAMASKY [56] Laborstudien mit einem homogenen Adaptationsfeld und einem inhomogenen Adaptationsfeld durch. Das in Abbildung 3.10 dargestellte inhomogene Adaptationsfeld wird dabei als geteiltes Adaptationsfeld realisiert, um nächtliche Verkehrssituationen aus Sicht des Fahrzeugführers zu simulieren. Des Weiteren wählt DAMASKY quadratische und stabförmige Objekte als Sehzeichen, um relevante Objekte im Straßenverkehr wie Verkehrszeichen oder Fußgänger vereinfacht darzustellen. [56]



Abbildung 3.10.: Versuchsaufbau der Detektionsstudie mit geteiltem Adaptationsfeld nach DAMASKY [56]; der dargestellte Beobachtungsschirm simuliert den nächtlichen Verkehrsraum aus Sicht eines Fahrzeugführers, die quadratischen und stabförmigen Objekte stehen vereinfacht für relevante Objekte im Straßenverkehr wie Verkehrszeichen oder Fußgänger.

Für die Auswertung der Ergebnisse verwendet DAMASKY die Unterschiedsempfindlichkeit (UE), welche den Reziprokwert des Schwellenkontrasts $K_{W,th}$ darstellt (siehe Gleichung 3.2). Die Ergebnisse zeigen, dass die Unterschiedsempfindlichkeit sowohl beim homogenen als auch beim geteilten Adaptationsfeld mit steigender Adaptationsleuchtdichte zunimmt und somit bessere Detektionsbedingungen für den Beobachter herrschen. Des Weiteren ist bei geteiltem Adaptationsfeld eine um etwa 15 bis 20 % niedrigere Unterschiedsempfindlichkeit zu beobachten als bei homogenem Adaptationsfeld mit gleicher Adaptationsleuchtdichte. In den Untersuchungen von DAMASKY zeigt sich ebenfalls der Einfluss der Objektgröße. So steigt die Unterschiedsempfindlichkeit mit steigender Objektgröße. [56]

$$UE = \frac{1}{K_{W,th}} \quad (3.2)$$

Studien von SCHMIDT-CLAUSEN [140] zeigen ebenfalls, dass der benötigte Schwellenkontrast mit steigender Objektgröße und Adaptationsleuchtdichte sinkt und damit bessere Detektionsbedingungen für den Beobachter entstehen.

ADRIAN [3] stellt durch die Analyse der Daten von BEREK [19] fest, dass je nach Objektgröße zwei Bereiche für die Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} definierbar sind. Überschreitet die Objektgröße einen kritischen Winkel, so ist die Schwellenleuchtdichtedifferenz in diesem Bereich unabhängig von der Objektgröße und hängt lediglich von der Umfeldleuchtdichte ab (Weber-Bereich). Ist die Objektgröße jedoch kleiner als der kritische Winkel, so hängt die Schwellenleuchtdichtedifferenz zusätzlich von der Objektgröße ab und folgt dem Ricco'schen Gesetz. Die Gleichungen 3.3 und 3.4 geben die zu den zwei Bereichen zugehörigen Formeln an. [3, 19]

$$\text{Weber-Bereich: } \log \Delta L_{th} = \text{const.} \quad (3.3)$$

$$\text{Ricco-Bereich: } \log \Delta L_{th} = -2 \log \alpha + k \quad (3.4)$$

In Abbildung 3.11 wird der durch ADRIAN beschriebene Zusammenhang für vier verschiedene Umfeldleuchtdichten im mesopischen Bereich dargestellt ($0,01 \text{ cd m}^{-2}$ in blau, $0,1 \text{ cd m}^{-2}$ in rot, 1 cd m^{-2} in gelb und 10 cd m^{-2} in lila). Aus Abbildung 3.11 wird deutlich, dass bei Objektgrößen, die kleiner als etwa $10'$ sind, die Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} dem Ricco'schen Gesetz folgt und sowohl von der Umfeldleuchtdichte L_U als auch von der Objektgröße α abhängig ist. Bei größeren Objekten findet ein Übergang in den Weber-Bereich statt und die Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} ist nicht mehr von der Objektgröße abhängig. Die Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte L_U bleibt weiterhin bestehen. [3]

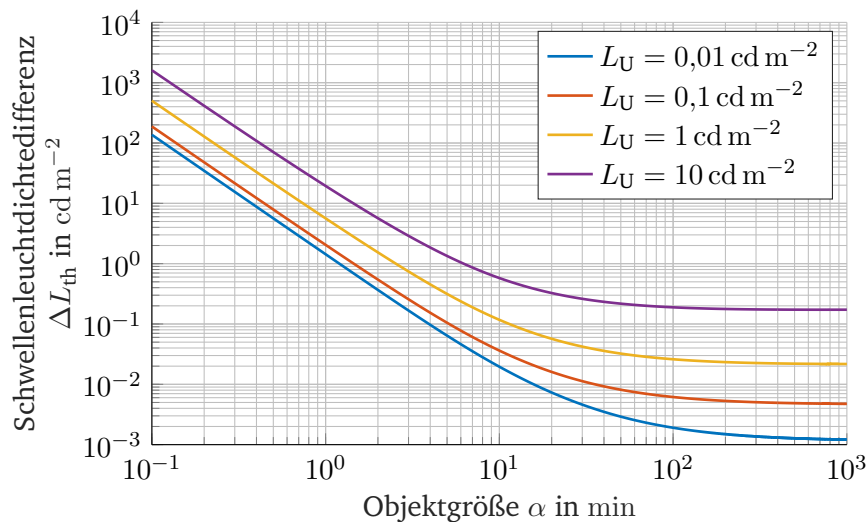


Abbildung 3.11.: Objektgrößenabhängige Bereiche für die Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} nach ADRIAN für verschiedene Umfeldleuchtdichten L_U ; im Ricco'schen Bereich ist die Schwellenleuchtdichtedifferenz von der Objektgröße und der Umfeldleuchtdichte abhängig und sinkt mit steigender Objektgröße, im Weber'schen Bereich ist die Schwellenleuchtdichtedifferenz zwar abhängig von der Umfeldleuchtdichte jedoch nicht mehr von der Objektgröße. [3]

Das Alter des Beobachters hat neben der Adaptationsleuchtdichte und der Objektgröße einen wesentlichen Einfluss auf die Kontrastwahrnehmung. Nach WEALE [178] sorgt das Altern der Augen dafür, dass weniger

Licht die Retina erreicht und dadurch die Sehleistung mit steigendem Alter verringert wird. Die Ursachen hierfür liegen nach WEALE in Veränderungen des maximal einstellbaren Pupillendurchmessers, der Vergilbung der Linse und zu einem kleinen Teil in der Änderung der effektiven Weglänge des Lichts durch die Linse. So reduziert sich die retinale Beleuchtungsstärke bei einem 60 Jahre alten Menschen im Vergleich zu einem 20 Jahre alten Menschen auf etwa ein Drittel. [178]

Um die Abhängigkeit der Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} vom Beobachteralter zu untersuchen führen BLACKWELL und BLACKWELL [24] Studien mit insgesamt 235 Versuchspersonen verschiedenen Alters durch. Die Studie wird mit 4' großen Landoltringen auf einem Hintergrund mit einer Leuchtdichte von 100 cd m^{-2} durchgeführt. Die Beobachter haben die Aufgabe, die Erkennung der Öffnung des Landoltrings mit einer Auswahlmethode („forced choice“) anzugeben. Bei der Datenanalyse von 234 der insgesamt 235 Versuchspersonen ist eine deutliche Abhängigkeit der benötigten Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} festzustellen, welche in Abbildung 3.12 dargestellt ist. [24]

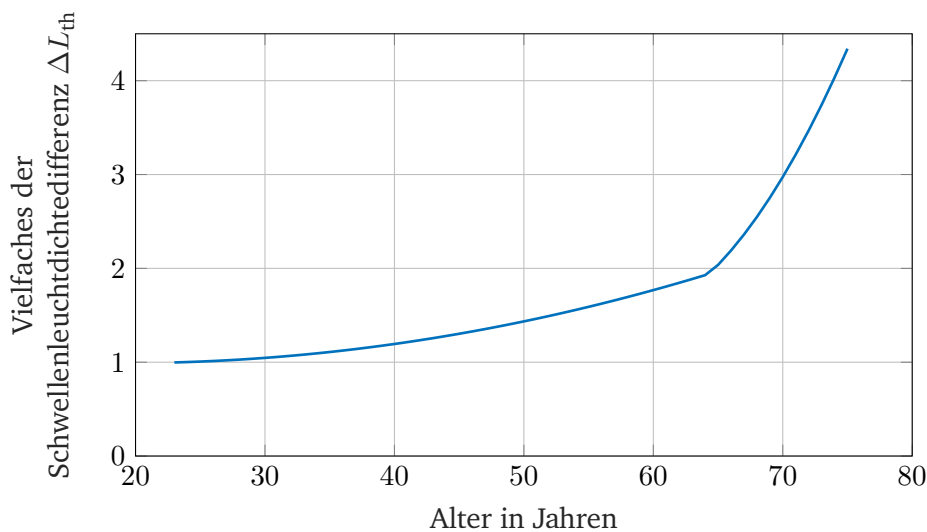


Abbildung 3.12.: Alterseinfluss auf die Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} nach BLACKWELL; das Alter der Beobachter hat einen erheblichen Einfluss auf die benötigte Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} , besonders ab einem Alter von 64 Jahren nimmt der Alterseinfluss deutlich zu. [24]

Wie in Abbildung 3.12 zu sehen, ist die benötigte Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} für einen 74 Jahre alten Beobachter etwa vier mal so groß wie für einen 23 Jahre alten Beobachter. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Alterseinfluss ab einem Alter von 64 Jahren deutlich ansteigt und somit wesentlich höhere Schwellenleuchtdichtedifferenzen für die Detektion von Objekten benötigt werden. [24]

SCHNEIDER [143] bestätigt den Alterseinfluss auf die Objektdetektion, indem eine Laborstudie mit zwei Altersgruppen (älter als 45 Jahre, jünger als 45 Jahre) durchgeführt wird, bei der die Versuchspersonen die Aufgabe haben kreisförmige Objekte und Objekte in Form eines Rehs unter verschiedenen Exzentrizitäten (0° bis 20°) zu detektieren. Die Hintergrundleuchtdichte beträgt bei der Untersuchung $0,1 \text{ cd m}^{-2}$ oder 1 cd m^{-2} . In allen Fällen benötigen die älteren Versuchspersonen höhere Kontraste für die Detektion der Objekte mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % als die jüngeren Probanden. [143]

Der Umfeldleuchtdichte- und Alterseinfluss auf den Schwellenkontrast wird durch eine Laborstudie von VÖLKER [171] ebenfalls bestätigt. Die durchgeführte Untersuchung verwendet vier Diaprojektoren, um variable Vorfeldleuchtdichten und Sehzeichen zu realisieren. Es werden zwei Schwellenkontraste betrachtet. Einerseits wird die Schwelle für „gerade gesehen“ bestimmt und andererseits werden Landoltringe verwendet, um die

Schwelle für „sicher gesehen“ zu untersuchen. Durch die Ergebnisse bestätigt VÖLKER, dass mit steigender Umfeldleuchtdichte der Schwellenkontrast sinkt und mit steigendem Alter der benötigte Schwellenkontrast ebenfalls steigt. [171]

Untersuchungen von AULHORN [14] und DAMASKY [56] bezüglich des Einflusses der Kontrastpolarität auf die Kontrastwahrnehmung zeigen, dass die Schwellenleuchtdichtedifferenzen ΔL_{th} für Positiv- und Negativkontraste zwar in der gleichen Größenordnung liegen aber im Falle des Negativkontrastes geringer sind als für den Positivkontrast. So zeigen die Laboruntersuchungen mit homogenem und geteiltem Adaptationsfeld von DAMASKY, dass die Unterschiedsempfindlichkeit bei Verwendung des Negativkontrasts um etwa 10 % bis 30 % höher ist als bei Verwendung des Positivkontrasts [56].

Verschiedene Forscher und Forschungsgruppen entwickeln anhand der Erkenntnisse über die verschiedenen Einflussgrößen Detektionsmodelle zur Beschreibung der Detektierbarkeit von Objekten im nächtlichen Straßenverkehr [3, 36, 41, 53, 54, 94, 95, 104, 108]. Das bekannteste dieser Modelle ist das Small Target Visibility (STV) Modell von ADRIAN [3], welches die Adaptationsleuchtdichte, die Objektgröße, die Darbietungszeit, die Kontrastpolarität und das Beobachteralter als unabhängige Parameter betrachtet (siehe Gleichung 3.5).

$$\Delta L_{th} = k \cdot \left(\frac{\sqrt{\Phi}}{\alpha} + \sqrt{L} \right)^2 \cdot \frac{a(\alpha, L_B) + t}{t} \cdot F_{CP} \cdot AF \quad (3.5)$$

mit

- ΔL_{th} : Schwellenleuchtdichtedifferenz
- k : Faktor für die Detektionswahrscheinlichkeit
- $\left(\frac{\sqrt{\Phi}}{\alpha} + \sqrt{L} \right)^2$: Lichtstrom- bzw. Leuchtdichtefunktion nach dem Ricco'schen bzw. Weber'schen Gesetz
- α : Objektgröße in Winkelminuten
- $a(\alpha, L_B)$: Blondel-Rey Konstante
- t : Darbietungszeit in Sekunden
- F_{CP} : Kontrastpolaritätsfaktor
- AF : Altersfaktor

Für die Berechnungsvorschriften der einzelnen Terme sei an dieser Stelle auf die Publikation von ADRIAN selbst verwiesen [3]. Eine Besonderheit des STV Modells ist die Möglichkeit den Faktor k anzupassen, um die Schwellenleuchtdichtedifferenz für verschiedene Detektionswahrscheinlichkeiten zu berechnen und somit Studienergebnisse aus Laboruntersuchungen mit unterschiedlichen angenommenen Detektionswahrscheinlichkeiten (50 %, 75 %, 90 %, 95 %, 99 %) zu vergleichen.[3]

In Abbildung 3.13 ist der Zusammenhang der betrachteten Detektionswahrscheinlichkeit und dem Faktor k dargestellt. Für eine Detektionswahrscheinlichkeit von 50 % nimmt der Faktor k einen Wert von 1 an. Wird eine Detektionswahrscheinlichkeit von 90 % betrachtet, so ist ein k -Faktor von 1,6 zu wählen. Standardmäßig wird der k -Faktor 2,6 gewählt, welcher einer Detektionswahrscheinlichkeit von 99,93 % entspricht. [2]

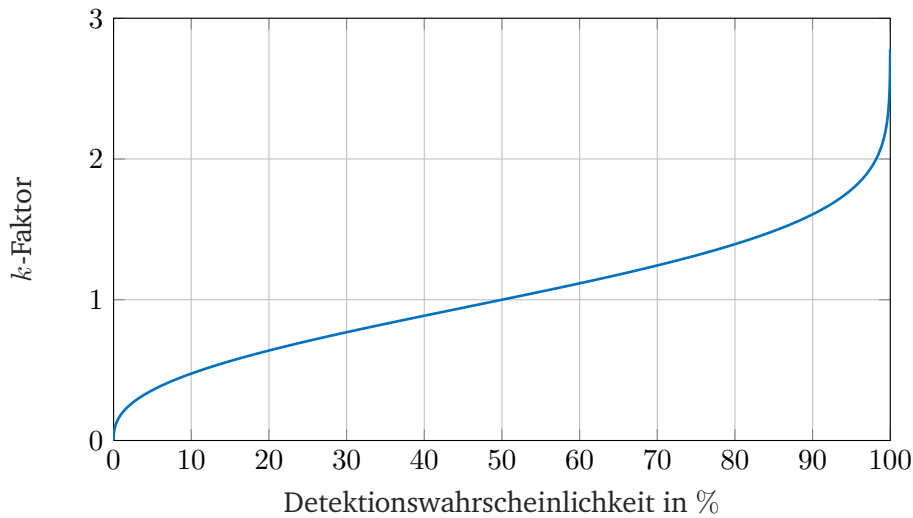


Abbildung 3.13.: Zusammenhang zwischen der betrachteten Detektionswahrscheinlichkeit und dem k -Faktor im STV Modell nach ADRIAN [2].

Da das STV Modell auf einer Datenbasis aus Laborstudien beruht, ist die berechnete Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} ebenfalls für Untersuchungen in kontrollierten Laborumgebungen gültig. Um diese Schwellenleuchtdichtedifferenz auf komplexe Straßenverkehrssituationen zu übertragen, wird das Visibility Level (VL) verwendet [3]. Das Visibility Level VL stellt das Verhältnis der aktuell im Gesichtsfeld des Beobachters herrschenden Leuchtdichtedifferenz ΔL zwischen Objekt und Umfeld zur mit dem STV Modell berechneten Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} dar (Gleichung 3.6) und wird in den USA als Basis für die Auslegung von Straßenbeleuchtungseinrichtungen verwendet [93].

$$VL = \frac{\Delta L}{\Delta L_{th}} = \frac{L_O - L_U}{\Delta L_{th}} \quad (3.6)$$

BULLOUGH [36, 41] entwickelt ebenfalls zwei Modelle basierend auf eigenen Detektionsstudien, welche zusammen mit VAN DERLOFSKE, HUNTER, SKINNER oder AKASHI durchgeführt werden. Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen ist dabei der Einfluss der peripheren Objektpositionen auf die Detektionswahrscheinlichkeit und die Reaktionszeit von Fahrzeugführern. Hierfür werden Objekte in einem Abstand von 60 m vor dem Fahrzeug in Winkeln von $-7,5^\circ$ auf der linken Seite bis $12,5^\circ$ auf der rechten Seite in 5° -Schritten positioniert. Die Beleuchtungsstärke auf den Detektionsobjekten ist variabel und wird über Neutralfilter eingestellt. Die zehn Versuchspersonen im Altersbereich von 23 bis 42 Jahren haben die Aufgabe geradeaus auf ein Fixationsobjekt zu schauen und sobald sie die randomisiert dargestellten Detektionsobjekte detektieren dies über einen Taster zu signalisieren. Damit wird sowohl die Detektionswahrscheinlichkeit als auch die Reaktionszeit für die verschiedenen Objektpositionen bestimmt. [35–37, 41, 42, 166–168]

Aus den ermittelten Daten wird ein Modell basierend auf der Reaktionszeit und ein Modell basierend auf der Detektionswahrscheinlichkeit abgeleitet, welche durch die Gleichungen 3.7 und 3.8 beschrieben werden.

$$\text{Reaktionszeitmodell: } RT = 8,89\Theta - 115 \log E - 332 \log S + 409 \log D - 49,3 \log \rho - 23,4R + 291 \quad (3.7)$$

$$\text{Missed-Targets-Modell: } MT = (0,000064\rho^{-3,11} \cdot |\Theta|^{3,95\rho^{0,63}} + 0,0099\rho^{-2,2}) \cdot E^{-0,49} \quad (3.8)$$

Im Reaktionszeitmodell steht RT für die Reaktionszeit, Θ für den Exzentrizitätswinkel, E für die Beleuchtungsstärke auf dem Objekt, S für die Objektgröße, D für den Abstand zwischen Beobachter und Objekt, ρ für

den Reflexionsgrad des Objekts und R für den Photopisch/Skopopisch Faktor [36]. Das Missed-Targets-Modell arbeitet ebenfalls mit dem Reflexionsgrad ρ , dem Exzentrizitätswinkel Θ und der Beleuchtungsstärke E um die Wahrscheinlichkeit für die Nicht-Detektion der Objekte MT zu berechnen [41]. Da die Modelle von BULLOUGH jedoch eine begrenzte Gültigkeit aufweisen, wird in dieser Arbeit das STV Modell von ADRIAN und das Visibility Level VL für die Analyse herangezogen.

Dadurch, dass das STV Modell Leuchtdichten zur Berechnung der Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} heranzieht, ist hier eine Abhängigkeit aufgrund der Oberflächeneigenschaften des Objektes und des Umfelds zu erwarten. Einen wesentlichen Einfluss haben dabei der Reflexionsgrad ρ bzw. Leuchtdichtefaktor β des Objektes und der Leuchtdichtekoeffizient q_0 der Fahrbahn, da diese die auftreffende Beleuchtungsstärke E mit der Leuchtdichte L verknüpfen.

Daher führen RANDRUP HANSEN und SCHANDEL LARSEN [130] Messungen an Kleidungsstücken von zufällig ausgewählten Fußgängern in Dänemark durch, um die Verteilung des Leuchtdichtefaktors β zu ermitteln. Hierfür werden die Kleidungsstücke von insgesamt 1024 Fußgängern vermessen. Die zufällig ausgewählten Fußgänger werden dabei in vier Altersgruppen unterteilt (Kinder: 0 bis 15 Jahre, Jugendliche: 15 bis 25 Jahre, Erwachsene: 25 bis 55 Jahre und Senioren: ab 55 Jahre). Des Weiteren wird zwischen männlichen und weiblichen Versuchspersonen unterschieden.

Die in Abbildung 3.14 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die winterliche Oberbekleidung sowohl bei männlichen als auch weiblichen Versuchspersonen einen Leuchtdichtefaktor β aufweist, welcher größtenteils unter 0,1 liegt. [130]

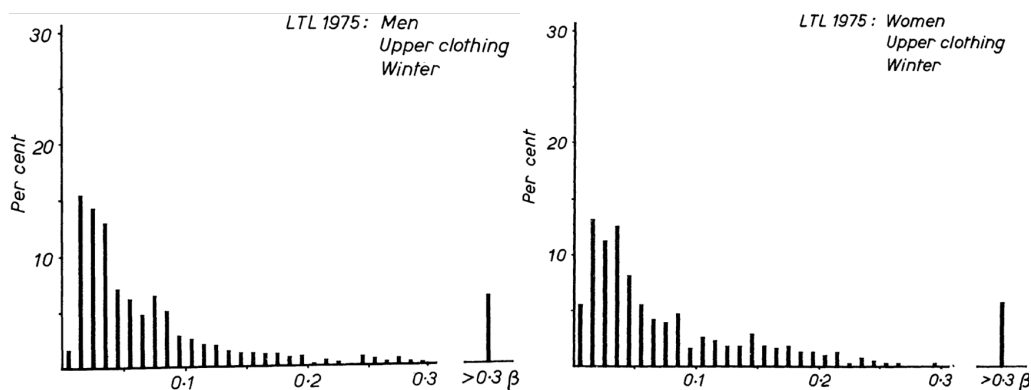


Abbildung 3.14.: Leuchtdichtefaktor β der Oberbekleidung von Fußgängern in Dänemark nach RANDRUP HANSEN und SCHANDEL LARSEN [130]; sowohl die winterliche Oberbekleidung von Männern (links) als auch die winterliche Oberbekleidung von Frauen weist einen Leuchtdichtefaktor β auf, welcher größtenteils unter 0,1 liegt.

Aus Abbildung 3.14 wird zudem deutlich, dass die Verteilung des Leuchtdichtefaktors β für die Oberbekleidung von männlichen und weiblichen Versuchspersonen sehr ähnlich ist. Diese Verteilung des Leuchtdichtefaktors β zeigt sich ebenfalls bei Betrachtung der Unterbekleidung. Weitere Erkenntnisse aus den Messungen sind, dass die Altersgruppe der Kinder (0 bis 15 Jahre) mit einem Anteil von 11 % deutlich mehr reflektierende Kleidungsstücke trägt als die restlichen Altersgruppen, bei denen der Anteil an reflektierenden Kleidungsstücken bei maximal 4 % liegt.

Einen weiteren Unterschied stellen RANDRUP HANSEN und SCHANDEL LARSEN beim Vergleich der Kleidungsstücke von Fußgängern aus städtischen und ländlichen Gebieten fest (siehe Abbildung 3.15). [130]

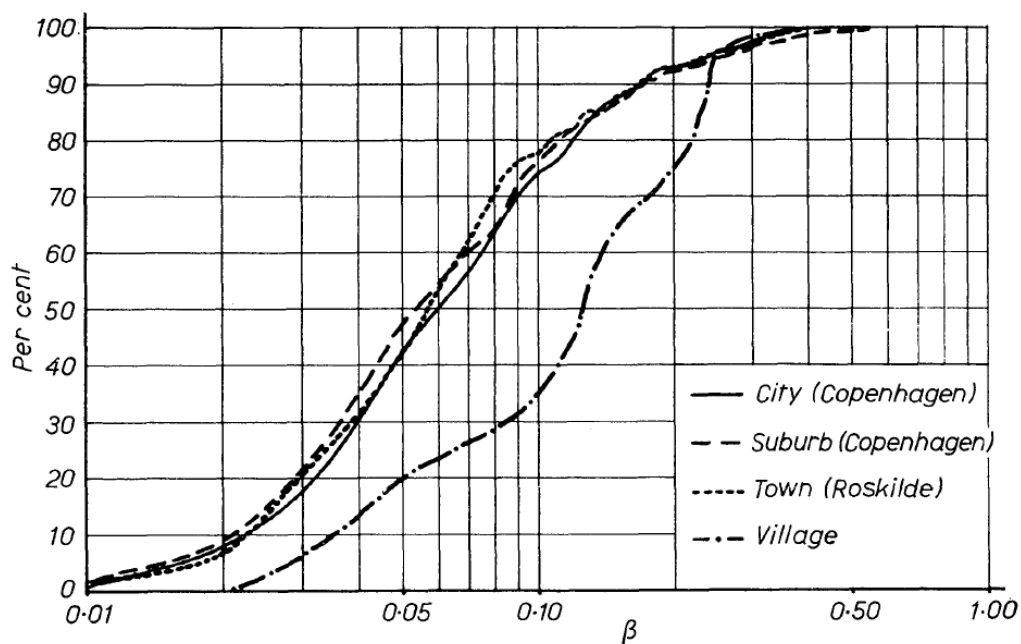


Abbildung 3.15.: Leuchtdichtefaktor β der Oberbekleidung von Fußgängern aus städtischen und ländlichen Gebieten in Dänemark nach RANDRUP HANSEN und SCHANDEL LARSEN [130]; es ist zu erkennen, dass die Kleidungsstücke der Fußgänger aus ländlichen Gebieten (Strich-Punkt-Linie) höhere Leuchtdichtefaktoren β aufweisen als die Kleidungsstücke von Stadtbewohnern.

Abbildung 3.15 zeigt, dass die Kleidungsstücke der Fußgänger aus ländlichen Gebieten höhere Leuchtdichtefaktoren β aufweisen als die Kleidungsstücke der Stadtbewohner. Während bei Stadtbewohnern etwa 75 % der Kleidungsstücke einen Leuchtdichtefaktor β von maximal 0,1 aufweisen, ist bei Fußgängern aus ländlichen Gebieten dieser Anteil mit etwa 35 % deutlich geringer (siehe Strich-Punkt-Linie in Abbildung 3.15). Außerdem stellen RANDRUP HANSEN und SCHANDEL LARSEN fest, dass der Anteil reflektierender Kleidungsstücke bei Landbewohnern mit 15 % deutlich höher ist als bei Stadtbewohnern (maximal 4,4 %). [130]

Eine ähnliche Untersuchung von SCHNEIDER [142] mit 150 Materialproben ergibt einen gemittelten Reflexionsgrad ρ von 4,07 % im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 680 nm und bestätigt somit die Erkenntnisse von RANDRUP HANSEN und SCHANDEL LARSEN.

Neben der Reflexionseigenschaften des Detektionsobjekts, spielen die Reflexionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche ebenfalls eine wesentliche Rolle für die Detektionsbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr. So bestimmt der Leuchtdichtekoeffizient q_0 der Fahrbahnoberfläche die Adaptationsleuchtdichte L_A und die Umfeldleuchtdichte L_U . KÖHLER [107] führt Untersuchungen durch, um den Leuchtdichtekoeffizienten für verschiedene Fälle im nächtlichen Straßenverkehr zu beschreiben. Dabei wird zwischen der Rückwärtsreflexion, welche für die Helligkeitswahrnehmung des Fahrzeugführers und die Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr relevant ist, und der Vorwärtsreflexion, welche vor allem für die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer relevant ist, unterschieden. Im Falle der Rückwärtsreflexion stellt KÖHLER fest, dass die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn über den mittleren Leuchtdichtekoeffizienten q_0 beschreibbar ist. Um den Leuchtdichtekoeffizienten für die Vorwärtsreflexion zu beschreiben, schlägt KÖHLER eine Funktion vor, welche von drei Parametern abhängig ist. Diese sind der vertikale Anleuchtewinkel, der vertikale Beobachtungswinkel und der horizontale Winkelversatz. [107]

Da im Rahmen dieser Arbeit die Blendung nicht betrachtet wird, wird im weiteren Verlauf der mittlere Leuchtdichtekoeffizient q_0 verwendet, welcher für verschiedene Fahrbahnoberflächen aus Tabellen der Commission International de l'Éclairage (CIE) zu entnehmen ist. Tabelle 3.2 zeigt die Leuchtdichtekoeffizienten für einige Fahrbahnoberflächen. [55]

Tabelle 3.2.: CIE-Werte für den Leuchtdichtekoeffizienten q_0 verschiedener Fahrbahnoberflächen [55]

Fahrbahnoberfläche	Leuchtdichtekoeffizient q_0 in $\text{cd m}^{-2} \text{lx}^{-1}$
CIE C1 - Beton	0,10
CIE C2 - Asphalt	0,07
CIE Klasse 1 - Sehr diffus	0,10
CIE Klasse 4 - Glänzender Asphalt	0,08
CIE W1 - Nasse Fahrbahnoberfläche	0,11
CIE W4 - Nasse Fahrbahnoberfläche	0,25

Der vorangegangene Abschnitt dient zum allgemeinen Verständnis der Objektdetektion und der beteiligten Einflussparameter. Im Folgenden werden Studien erörtert, welche sich mit der Objektdetektion in nächtlichen Verkehrssituationen beschäftigen. Dadurch, dass je nach Ortslage die Beitragsleister für die Licht- und Detektionsbedingungen unterschiedlich sind, wird hier zwischen vorangegangenen Detektionsuntersuchungen außerhalb und innerhalb geschlossener Ortschaften unterschieden. Während außerhalb geschlossener Ortschaften die Kfz-Scheinwerfer alleiniger Beitragsleister für die Licht- und Detektionsbedingungen sind, gibt es innerhalb geschlossener Ortschaften mit der ortsfesten Straßenbeleuchtung einen zusätzlichen Beitragsleister.

3.3.1. Detektion außerhalb geschlossener Ortschaften

DAMASKY [56] führt neben den bereits beschriebenen Laboruntersuchungen Feldstudien durch, um den Einfluss von realen Verkehrssituationen auf die Unterschiedsempfindlichkeit UE zu untersuchen. Hierfür wird ein eigens konstruiertes Head-Up-Display verwendet, welches die Objekte in das Gesichtsfeld des Fahrzeugführers projiziert. Die Objektleuchtdichte der projizierten Sehzeichen ist einstellbar, sodass eine Übertragung der Laboruntersuchung mit geteiltem Adaptationsfeld in die reale Verkehrssituation erfolgt. Die Untersuchungen werden sowohl auf einem abgesperrten Versuchsgelände als auch im realen Straßenverkehr bei Nacht durchgeführt. Eine weitere Variation wird angewendet, indem die Objektpositionen den Versuchspersonen vorher bekannt gegeben wird oder nicht. Die Ergebnisse der durchgeführten Studien zeigen, dass bei jeder Erhöhung der Komplexitätsstufe, beispielsweise durch die zusätzliche Fahraufgabe, der Ortschaft (Autobahn, Landstraße, Stadt) oder der Position der Objekte, die Unterschiedsempfindlichkeit UE herabgesetzt wird. So wird für den Übergang von der Laboruntersuchung mit geteiltem Umfeld zum statischen Feldversuch mit unbekannter Objektposition ein um den Faktor 12,7 höherer Schwellenkontrast benötigt, um die Objekte zu detektieren. Dieser Faktor wird als Feldfaktor bezeichnet und ist vergleichbar mit dem Visibility Level. Des Weiteren bestätigt DAMASKY die Abhängigkeit der benötigten Schwellenwerte von der Objektgröße im Feldversuch, wie in Abbildung 3.16 auf der linken Seite dargestellt. Auf der rechten Seite von Abbildung 3.16 ist dagegen die Abhängigkeit der benötigten Objektleuchtdichte L_O vom Exzentrizitätswinkel Θ dargestellt. Um die dargestellte Datenlage zu erlangen, werden die Daten aus den Untersuchungen von DAMASKY am Exzentrizitätswinkel 0° gespiegelt. Hierbei ist auffällig, dass die Abhängigkeit der Objektleuchtdichte L_O vom Exzentrizitätswinkel Θ durch eine Gaußfunktion beschrieben werden kann und somit die benötigte Objektleuchtdichte L_O mit steigendem Exzentrizitätswinkel Θ sinkt. [56]

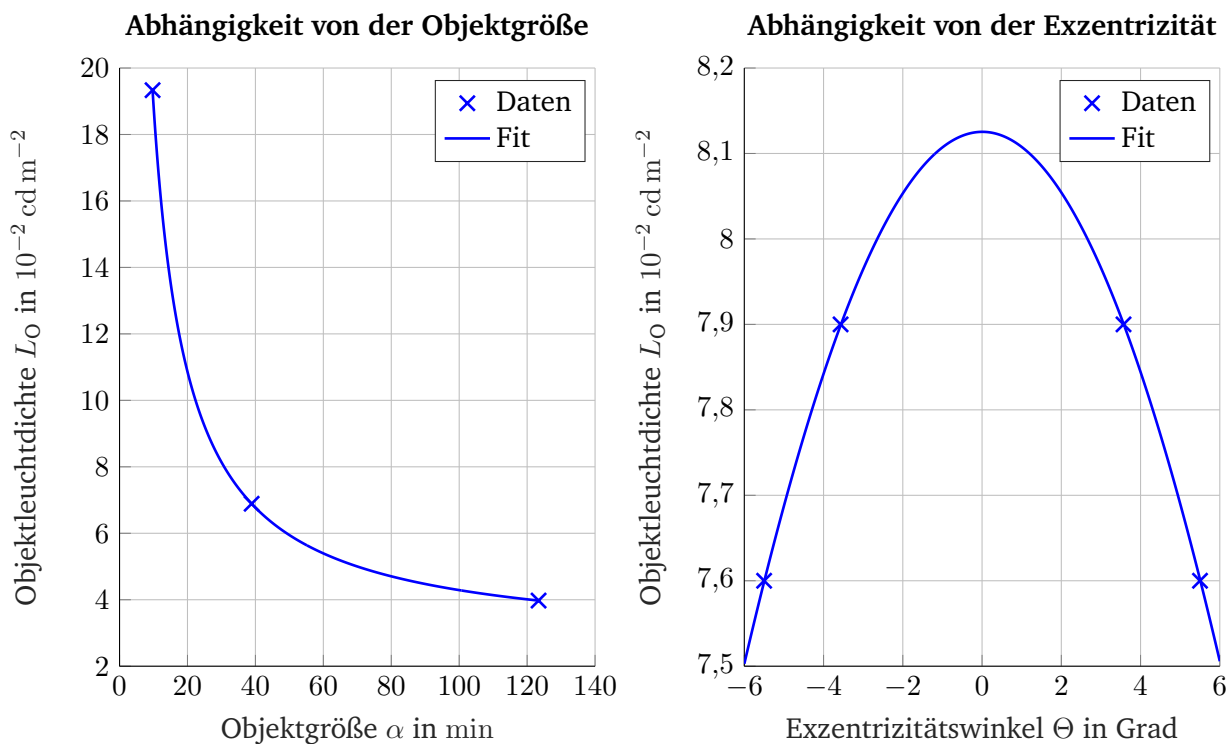


Abbildung 3.16.: Abhängigkeit der benötigten Objektleuchtdichte L_O von der Objektgröße α (links) und dem Exzentrizitätswinkel Θ (rechts) nach DAMASKY; Sowohl mit steigender Objektgröße α als auch mit steigendem Exzentrizitätswinkel Θ sinkt die für die Detektion benötigte Objektleuchtdichte L_O , für beide Fitfunktionen ist das Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,99$. [56]

VÖLKER [171] führt Untersuchungen in einem Lichtkanal mit kontrollierten Umgebungsbedingungen durch, um die Einflussparameter auf die Erkennbarkeitsentfernung zu bestimmen. Hierzu nutzt VÖLKER 17 verschiedene Scheinwerferlichtverteilungen und fünf verschiedene Detektionsobjekte mit unterschiedlichen Komplexitäten und Reflexionsgraden (helle und dunkle Puppe, Reh, Hase, graue Tafel). Die Objekte bewegen sich bei der Untersuchung auf die hinter den Scheinwerferpaaren sitzenden Versuchspersonen zu, welche die Aufgabe haben die Erkennung der Objekte zu signalisieren. Aus den Untersuchungsergebnissen zieht VÖLKER folgende Schlüsse. Die Erkennbarkeitsentfernung, welche sich im Mittel zwischen 55 m und 100 m befindet, hängt sowohl von der Scheinwerferlichtverteilung als auch von der Form und dem Reflexionsgrad der Sehobjekte ab. Dabei stellt der erzeugte Kontrast ein geeignetes Maß für die Vorsage der Erkennbarkeitsentfernung dar. Eine Erhöhung der Formkomplexität sorgt für geringere Erkennbarkeitsentfernungen. Hohe Leuchtdichten oder inhomogene Leuchtdichteverteilungen beeinflussen die Erkennbarkeitsentfernung nicht. Es ist kein Zusammenhang zwischen der Erkennbarkeitsentfernung und der Akzeptanz der Scheinwerferlichtverteilung bei den Versuchspersonen festzustellen. [115, 171]

Dynamische Felduntersuchungen von HILLS [90–92] auf unbeleuchteten Straßen haben das Ziel den Einfluss der Objektgröße α und der Fahrgeschwindigkeit v auf die Detektionsentfernung zu bestimmen. Als Detektionsobjekte werden scheibenförmige und menschenförmige Sehzeichen genutzt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass mit steigender Objektgröße α die Detektionsentfernung ebenfalls steigt. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten v sinkt dagegen die Detektionsentfernung. [90–92]

KOKOSCHKA und GALL [108] zeigen in dynamischen Untersuchungen mit 29 Versuchspersonen und Sehzeichen

unterschiedlichen Reflexionsgrades ρ , dass der Reflexionsgrad ρ der Detektionsobjekte einen signifikanten Einfluss auf die Detektionsentfernung dieser Objekte im nächtlichen Straßenverkehr außerhalb geschlossener Ortschaften hat. Sowohl beim Kriterium „gerade gesehen“ als auch beim Kriterium „sicher gesehen“ ist die Detektionsentfernung für die helleren Detektionsobjekte größer. Für das Kriterium „gerade gesehen“ steigt die Detektionsentfernung von 121 m für das dunkle Sehzeichen auf 146 m für das helle Sehzeichen. Wird das Kriterium „sicher gesehen“ betrachtet, beträgt der Anstieg in der Detektionsentfernung 28 m (dunkles Sehzeichen: 103 m, helles Sehzeichen: 131 m). [108]

Neben der bereits erläuterten Laboruntersuchung ermittelt SCHNEIDER [143] in einer Felduntersuchung den Einfluss der Objektposition (Exzentrizitätswinkel Θ) auf die Detektierbarkeit eines Fußgängers. Hierzu wird, wie in Abbildung 3.17 dargestellt, der Fußgänger sowohl rechts neben der Fahrbahn mit einem Abstand zur Fahrbahnmitte von 5,0 m, 9,6 m, 12,5 m oder 15,5 m als auch links von der Fahrbahn mit einem Abstand zur Fahrbahnmitte von 5,8 m oder 6,8 m positioniert. Dabei ist das Versuchsobjekt bei jedem Durchlauf zufällig auf einer der sechs Positionen platziert. Ausgewertet werden jedoch lediglich die Objekte rechts neben der Fahrbahn und die Objekte links neben der Fahrbahn dienen dazu, Lerneffekte bei den Versuchspersonen zu vermeiden. [143]

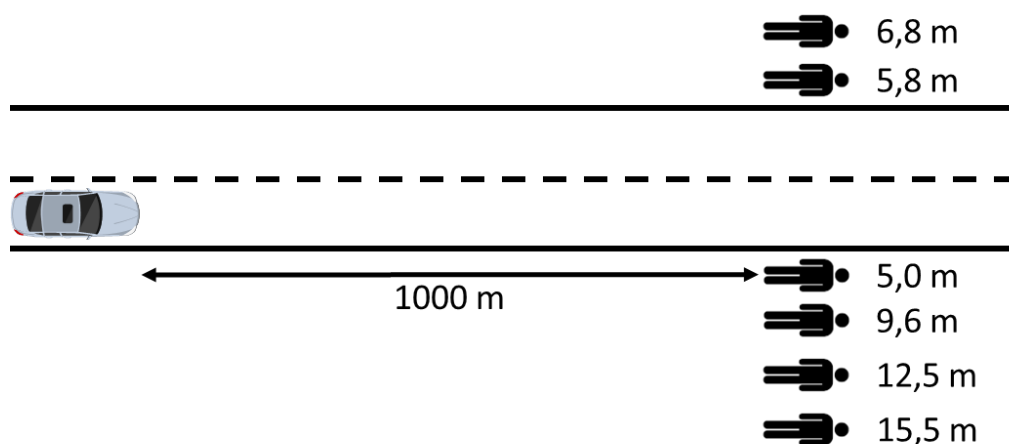


Abbildung 3.17.: Versuchsaufbau der Felduntersuchungen zum Einfluss des Exzentrizitätswinkels Θ auf die Detektionsentfernung nach SCHNEIDER [143]; während die Objekte rechts neben der Fahrbahn in die Datenauswertung eingehen, dienen die Objekte links neben der Fahrbahn zur Vermeidung möglicher Lerneffekte.

Die Felduntersuchung wird in zwei Varianten mit älteren und jüngeren Versuchspersonen und einem Testfahrzeug mit eingeschaltetem Fernlicht durchgeführt. Im quasistatischen Test sitzt die Versuchsperson auf dem Fahrersitz und das Objekt bewegt sich auf das Versuchsfahrzeug zu. Dabei ändert sich der Abstand zwischen Detektionsobjekt und Fahrbahnmitte nicht. Im dynamischen Fall fährt die Versuchsperson das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 80 km h^{-1} die Teststrecke entlang. In beiden Varianten signalisiert die Versuchsperson die Detektion des Detektionsobjekts über einen Tastendruck und die Detektionsentfernung wird mittels Global Positioning System (GPS) Sensoren gemessen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass ältere Versuchspersonen etwas kürzere Detektionsentfernungen haben als jüngere Versuchspersonen. Somit werden die Ergebnisse bezüglich des negativen Effekts des Alters auf die Sehleistung bestätigt. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Fahraufgabe die Detektionsentfernung ebenfalls beeinflusst. So werden im quasistatischen Versuchsteil bei allen Exzentrizitäten höhere Detektionsentfernungen erreicht als im dynamischen Fall. Der

Feldfaktor, welcher analog zum Visibility Level den Multiplikator zwischen Labor- und Felduntersuchungen darstellt, befindet sich für das gesamte Probandenkollektiv in einem Bereich von 8,75 bis 32. Somit werden in realen Verkehrssituationen deutlich höhere Kontraste für die sichere Detektion der Sehzeichen benötigt als im Labor.

Anhand der ermittelten Detektionsentfernungen, welche im Durchschnitt bei etwa 90 m liegen, ist keine direkte Abhängigkeit der Detektionsentfernung von der Exzentrizität zu erkennen. Daher betrachtet SCHNEIDER die bei den ermittelten Detektionsentfernungen benötigten Kontraste und berechnet daraus die erforderliche Lichtstärke. Erneut werden die Messdaten gespiegelt, um die Objektpositionen rechts und links neben der Fahrbahn zu berücksichtigen. Der Verlauf der benötigten Lichtstärke für das Detektionsobjekt in etwa 90 m Entfernung in Abhängigkeit der horizontalen Objektposition ist in Abbildung 3.18 dargestellt. [143]

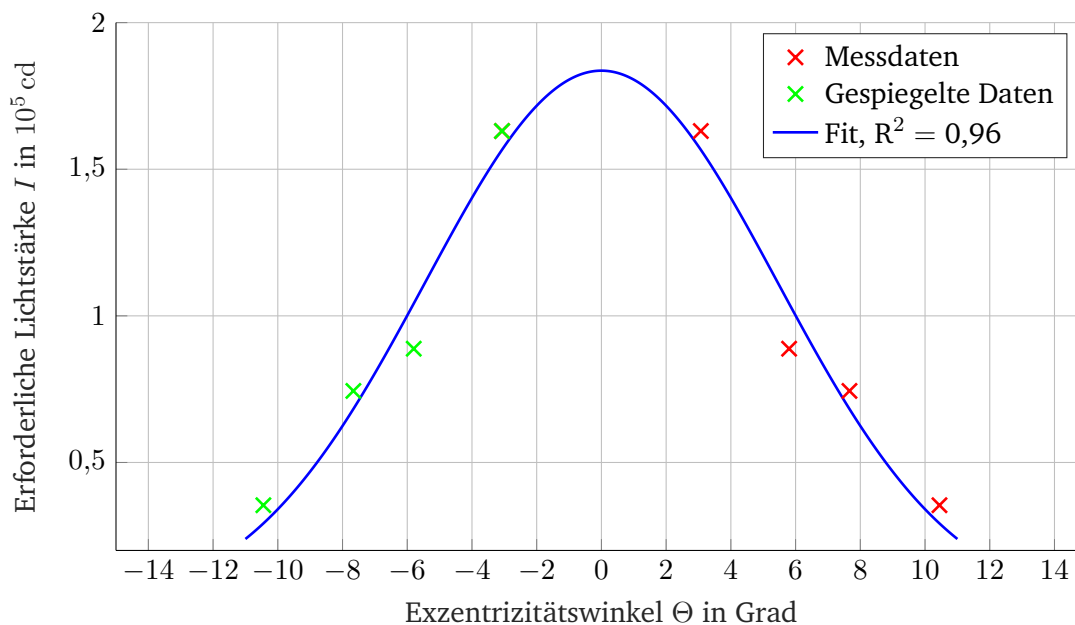


Abbildung 3.18.: Abhängigkeit der benötigten Lichtstärke I für ein Detektionsobjekt in etwa 90 m Entfernung in Abhängigkeit des Exzentrizitätswinkels Θ nach den Felduntersuchungen von SCHNEIDER; mit größer werdendem Exzentrizitätswinkel sinkt die erforderliche Lichtstärke, das Bestimmtheitsmaß der Korrelation beträgt $R^2 = 0,96$ [143].

Bei Betrachtung des Lichtstärkeverlaufs in Abbildung 3.18 ist ersichtlich, dass die benötigte Lichtstärke für die Detektion eines Fußgängers in etwa 90 m Entfernung bei größer werdendem Exzentrizitätswinkel Θ sinkt. Damit werden die Ergebnisse aus den Feldstudien von DAMASKY [56] qualitativ durch die Untersuchungen von SCHNEIDER bestätigt. [143]

Weitere dynamische Felduntersuchungen von SCHNEIDER [142], TOTZAUER [156], SPRUTE [150], ZYDEK [184], KOBBERT [105] und KOSMAS [109] beschäftigen sich mit der Verbesserung der Detektionsbedingungen durch AFS- und ADB-Systeme.

So entwickelt SCHNEIDER [142] ein „Markierungslicht“, welches relevante Objekte im nächtlichen Straßenverkehr mit einem schwenkbaren Modul gezielt anleuchtet, um die Aufmerksamkeit des Fahrzeugführers in Richtung des Hindernisses zu lenken und somit die Reaktion zu beschleunigen. Um dieses System zu validieren, führt SCHNEIDER statische und dynamische Feldstudien durch. Hierzu werden sowohl Reaktions-

zeitmessungen als auch Fehlerratenanalysen bei der Detektion von verschiedenen Objekten in verschiedenen Entfernungen und horizontalen Positionen durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass im statischen Fall das Markierungslicht sowohl bei der Erkennungsfehlerrate als auch bei der Reaktionszeit sowohl dem Abblendlicht als auch dem Fernlicht überlegen ist. Die Fehlererkennungsrate, welche bei Entfernungen von 50 m, 70 m und 90 m ausgewertet wird, steigt für alle Lichtfunktionen mit steigendem Abstand. Beim Abblendlicht beträgt sie etwa 63 % für einen Objektabstand von 50 m und 100 % für einen Objektabstand von 90 m. Mit der Nutzung des Fernlichts wird diese Rate auf etwa 7 % in 50 m Entfernung und etwa 67 % in 90 m Entfernung reduziert. Das Markierungslicht sorgt hingegen für Erkennungsfehlerraten, die bei allen betrachteten Entfernungen unter 20 % liegen (1 % bei 50 m, 19 % bei 90 m).

Die Reaktionszeiten bei Nutzung der verschiedenen Lichtfunktionen sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Aus den Werten wird ersichtlich, dass das Markierungslicht im Vergleich zum Abblend- und Fernlicht sowohl die geringste Reaktionszeit mit 1,53 s als auch die geringste Standardabweichung mit 0,29 s aufweist und somit eine Verbesserung der Detektionsbedingungen mit sich bringt. Der dynamische Versuch zeigt zusätzlich zu den statischen Ergebnissen, dass die mittlere Erkennungsreichweite von 29,11 m bei Nutzung des Abblendlichts auf 62,75 m durch die Nutzung des Markierungslichts mehr als verdoppelt wird. [142]

Tabelle 3.3.: Vergleich der Reaktionszeiten bei Verwendung von Abblend-, Fern- und Markierungslicht [142]

Lichtfunktion	Mittlere Reaktionszeit in s	Standardabweichung in s
Abblendlicht	2,42	0,85
Fernlicht	2,15	0,50
Markierungslicht	1,53	0,29

Im Rahmen der Untersuchungen von SPRUTE [150] wird zunächst eine Abschätzung des Nutzungspotenzials der Fernlichtfunktion ermittelt. Hierfür befahren 15 Versuchspersonen im Alter von 26 bis 55 Jahren insgesamt drei Teststrecken jeweils zweimal. Als Teststrecken werden dabei Landstraßen ausgewählt, um den Probanden die Wahrnehmung der Fernlichtverteilung zu ermöglichen.

Bei der ersten Fahrt fahren die Versuchspersonen ohne Instruktionen, das bedeutet sie fahren so wie sie es gewohnt sind. Vor der zweiten Testfahrt bekommen die Versuchspersonen die Instruktion, dass sie das Fernlicht so häufig wie möglich betätigen sollen. Alle Versuchsfahrten werden zusätzlich mit einem Videorecorder aufgezeichnet, um das tatsächliche Fernlichtnutzungspotenzial zu ermitteln. Die in Abbildung 3.19 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sowohl bei Betrachtung der Fahrstrecke als auch bei Betrachtung der Fahrzeit ein deutlicher Anstieg der Fernlichtnutzung nach der Instruktion erfolgt. So steigt der durchschnittliche Streckenanteil, welcher mit aktiviertem Fernlicht befahren wird, von 38,1 % durch die Instruktion auf 62,9 %. Für die Fahrzeit wird eine Steigerung der Fernlichtnutzung von 29,5 % bei der ersten Fahrt (ohne Instruktion) auf 52,3 % bei der zweiten Fahrt (mit Instruktion) erreicht. Auffällig ist jedoch, dass das volle Fernlichtnutzungspotenzial von 71,4 % bezogen auf die Fahrstrecke bzw. 60,5 % bezogen auf die Fahrzeit durch die manuelle Fernlichtschaltung nicht ausgeschöpft wird. Daher ist nach SPRUTE die Nutzung von ADB-Systemen in dieser Situation sinnvoll. In einer erweiterten Studie stellt SPRUTE fest, dass mit ADB-Systemen, wie dem Matrix-Scheinwerfer, der gleitenden Leuchtweite oder dem maskierten Dauerfernlicht, die Detektionsentfernung um bis zu 18 m im Vergleich zu Systemen mit manueller Fernlichtschaltung erhöht wird. [150]

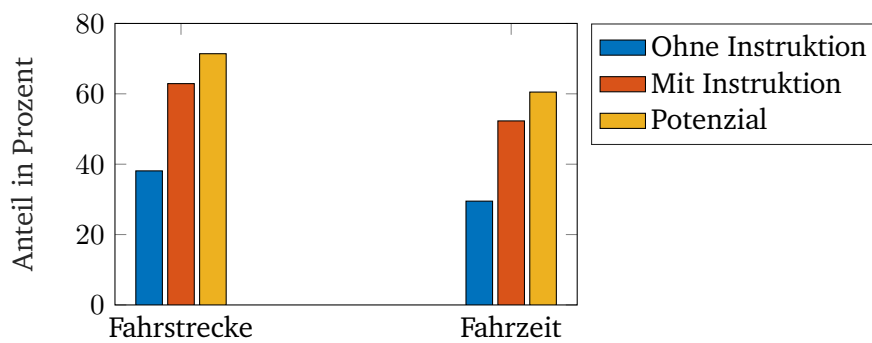


Abbildung 3.19.: Fernlichtnutzung auf Landstraßen; durch die Instruktion das Fernlicht so häufig wie möglich zu betätigen, wird die Fernlichtnutzung sowohl bezogen auf die Fahrstrecke als auch bezogen auf die Fahrzeit deutlich erhöht, dennoch wird das gesamte Nutzungspotenzial durch die manuelle Schaltung des Fernlichts nicht ausgeschöpft [150].

ZYDEK [184] führt ebenfalls dynamische Felduntersuchungen durch, um ein ADB-System auf Xenonbasis (engl. High Intensity Discharge (HID)) mit Ablend- und Fernlichtverteilungen von Halogen- und Xenon-Scheinwerfern bezüglich der Detektionsbedingungen und der Blendung zu vergleichen. Hierzu wird die Detektionsentfernung gemessen, indem die Versuchspersonen, welche eine gerade Teststrecke mit einer Geschwindigkeit von 80 km h^{-1} befahren, einen Taster betätigen sobald sie die Detektionsobjekte (menschensförmige Dummies) am rechten Fahrbahnrand detektiert haben. Die Daten für die Blendungsbetrachtung werden erfasst, indem einerseits die im Gegenverkehrfahrzeug befindlichen Versuchspersonen eine Sehaufgabe erfüllen und der dafür benötigte Schwellenkontrast ermittelt wird (physiologische Blendung). Andererseits bewerten die Versuchspersonen die subjektiv empfundene Blendung auf der DE BOER Skala [59] von „1 - unerträglich“ über „5 - gerade zulässig“ bis „9 - unmerklich“ (psychologische Blendung). Die Ergebnisse für die Detektionsentfernung und die Blendungsdaten bei Nutzung der verschiedenen Lichtfunktionen sind in Tabelle 3.4 dargestellt. [184]

Tabelle 3.4.: Vergleich der Detektionsdistanzen und der Blendungsdaten bei Verwendung von Ablend-, Fern- und blendfreiem Fernlicht mit Halogen- und Xenonlampen [184]

Lichtfunktion	Mittlere Detektionsentfernung in m	Schwellenkontrast	DE BOER Bewertung
Halogen-Ablendlicht	58,20	6,40	7,60
Xenon-Ablendlicht	88,40	7,44	7,20
Halogen-Fernlicht	131,50	27,38	2,10
Xenon-Fernlicht	141,30	46,51	1,70
Xenon-gfHB	120,40	7,77	7,10

Aus Tabelle 3.4 wird ersichtlich, dass die mit dem ADB-System erreichte Detektionsentfernung eher im Bereich der Fernlichtfunktionen einzuordnen ist. Gleichzeitig liegen die Daten für die physiologische (Schwellenkontrast) und psychologische Blendung (DE BOER Bewertung) im Bereich der Ablendlichtfunktionen. Somit zeigt ZYDEK, dass durch ADB-Systeme Detektionsentfernungen im Fernlichtbereich erreicht werden ohne die Blendefahr über das Ablendlichtniveau hinaus zu erhöhen. [184]

Einen Vergleich zwischen den Detektionsentfernungen bei der Nutzung von Ablendlicht, Fernlicht und LASER-Zusatzfernlicht stellt KOBBERT [105] in seinen Untersuchungen an. Hierzu wird ein dynamischer

Fahrversuch auf einem abgesperrten Testgelände durchgeführt. Als Testfahrzeug dient ein Sportwagen mit LED-Abblendlicht, LED-Fernlicht und einem LASER-Zusatzfernlicht. Erneut haben die Versuchspersonen die Aufgabe während der Fahrt mit 60 km h^{-1} einen Taster zu betätigen sobald sie das Detektionsobjekt (menschenförmiger Dummy) detektiert haben. Die Detektionsentfernungen für die verschiedenen verwendeten Lichtfunktionen werden bei Detektionswahrscheinlichkeiten von 50 % und 95 % ausgewertet und sind in Tabelle 3.5 dargestellt. [105]

Tabelle 3.5.: Detektionsentfernungen bei Verwendung der Abblendlicht-, Fernlicht- und LASER-Zusatzfernlichtfunktion [105]

Lichtfunktion	Mittlere Detektionsentfernung in m ($p = 50\%$)	Mittlere Detektionsentfernung in m ($p = 95\%$)
Abblendlicht	48,0	26,0
Fernlicht	103,2	68,0
LASER-Zusatzfernlicht	167,4	107,1

Bei Betrachtung der Detektionsentfernungen fällt auf, dass die Detektionsentfernungen für das Abblendlicht sowohl für 50 % als auch für 95 % Detektionswahrscheinlichkeit eher gering ausfallen. Dies begründet KOBBERT damit, dass durch die Verwendung eines Sportwagens als Testfahrzeug die Scheinwerferanbauhöhe deutlich niedriger ist als bei anderen Fahrzeugklassen und somit die Reichweite des um $-0,57^\circ$ (entspricht -1%) geneigten Abblendlichts insgesamt sehr gering ist. Weiterhin ist an den Daten zu erkennen, dass durch die Verwendung des Fernlichts die Detektionsentfernung im Vergleich zum Abblendlicht um etwa 42 m erhöht wird (Detektionswahrscheinlichkeit $p = 95\%$). Wird nun das LASER-Zusatzfernlicht zugeschaltet, erhöht sich die Detektionsentfernung von 68,0 m für das Fernlicht auf 107,1 m für das LASER-Zusatzfernlicht, was einen Detektionsentfernungsanstieg von 39,1 m bedeutet. Somit ist das LASER-Zusatzfernlicht in der Lage einen ähnlichen Sichtweitenanstieg im Vergleich zum Fernlicht zu ermöglichen wie das Fernlicht im Vergleich zum Abblendlicht. [105]

Die Untersuchungen von TOTZAUER [156] und KOSMAS [109] verfolgen einen anderen Ansatz. So untersucht TOTZAUER den Einfluss der Breite des ausgeblendeten Bereichs von blendfreien Fernlichtsystemen auf ihre Störfaktoren und Akzeptanz bei Fahrzeugführern. Hierzu werden insgesamt 14 Versuchspersonen zu verschiedenen Kriterien, wie „Beste Ausleuchtung aus Sicht des gfHB-Fahrers“, „Angenehmste Lückenbreite aus Sicht des gfHB-Fahrers“ und „Angenehmste Lückenbreite aus Sicht des vorausfahrenden Fahrers“, befragt. Die Lückenbreiten betragen $0,3^\circ$, $0,9^\circ$ und $1,5^\circ$. Die Ergebnisse dieser Befragung sind in Tabelle 3.6 zu sehen. [156]

Tabelle 3.6.: Anteile der Versuchspersonen, die für die verschiedenen Akzeptanzkriterien eine der drei präsentierten Lückenbreiten bevorzugen [156]

Kriterium	Lückenbreite $0,3^\circ$	Lückenbreite $0,9^\circ$	Lückenbreite $1,5^\circ$
Beste Ausleuchtung (gfHB-Fahrer)	9	1	4
Angenehmste Lückenbreite (gfHB-Fahrer)	4	4	6
Angenehmste Lückenbreite (vorausfahrender Fahrer)	1	4	9

Die Ergebnisse der Befragung zeigen, dass ein großer Teil der Versuchspersonen die beste Ausleuchtung bei einer Lückenbreite von $0,3^\circ$ sehen. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass beim Kriterium der angenehmsten Lückenbreite für den vorausfahrenden Fahrer der Großteil der 14 Versuchspersonen die größte dargebotene Lückenbreite von $1,5^\circ$ bevorzugen. Lediglich beim Kriterium der angenehmsten Lückenbreite für den gfHB-Fahrer sind sich die Versuchspersonen nicht einig. Trotz der ausgeglichenen Verteilung über die dargebotenen Lückenbreiten zeigt sich mit 6 aus 14 Versuchspersonen eine leichte Tendenz zur größten Lückenbreite von $1,5^\circ$. [156]

KOSMAS [109] untersucht in dynamischen Felduntersuchungen den Einfluss der Fernlichtintensität auf die Lesbarkeit und Eigenblendung retroreflektierender Verkehrszeichen. Verkehrszeichen reflektieren das auftreffende Licht aufgrund ihrer retroreflektierenden Eigenschaft in die gleiche Richtung zurück aus der das Licht auch ursprünglich emittiert wurde. Ist die Intensität des auftreffenden Lichts zu hoch, entsteht eine Blendungssituation und der Fahrzeugführer wird geblendet und kann das Verkehrszeichen nicht mehr lesen (siehe Abbildung 3.20 oben). Daher führt KOSMAS dynamische Untersuchungen mit verschiedenen Fernlichtintensitäten und Verkehrszeichengrößen durch, um abstandsabhängig die ideale Fernlichtintensität für die Lesbarkeit der Verkehrszeichen zu bestimmen. Die in Abbildung 3.20 unten dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei größeren Verkehrszeichen ($A = 1,058 \text{ m}^2$) bei Entfernungen unterhalb 280 m bereits eine Intensitätsreduktion für die Lesbarkeit und Vermeidung der Eigenblendung retroreflektierender Verkehrszeichen erforderlich ist. Bei kleineren Verkehrszeichen ($A = 0,442 \text{ m}^2$) ist dies bei Entfernungen unterhalb 200 m der Fall. [109]

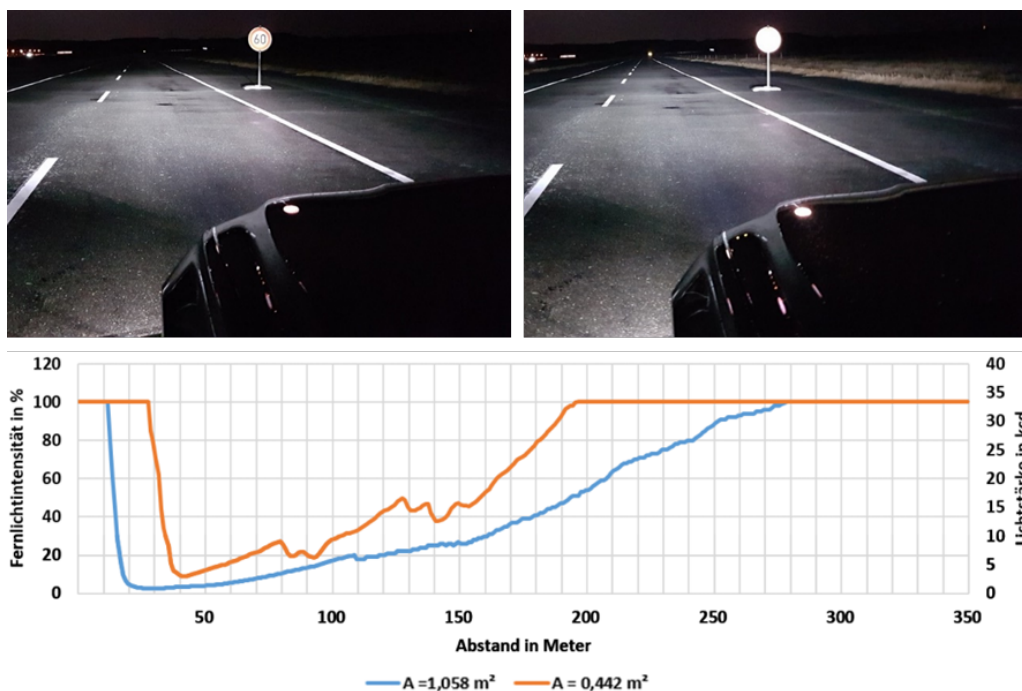


Abbildung 3.20.: Blendungssituation durch zu hohe Fernlichtintensität bei der Anleuchtung von Verkehrszeichen (oben), durch KOSMAS vorgeschlagene Fernlichtintensitätssteuerung für die ideale Anleuchtung von Verkehrszeichen (unten) [109].

Neben Untersuchungen im realen nächtlichen Straßenverkehr werden vermehrt Simulatorstudien eingesetzt, um tageszeit- und witterungsunabhängig Studien durchzuführen. Nachfolgend werden simulierte Detektionsuntersuchungen außerhalb geschlossener Ortschaften von BRÉMOND et al. [29] und DUMONT et al. [67] erörtert.

Mit insgesamt 27 Versuchspersonen, deren Durchschnittsalter 35 Jahre beträgt, führen BRÉMOND et al. [29] die Studien durch. Hierfür wird in einer Simulationsumgebung eine Landstraßensituation mit vier Fahrspuren simuliert. Die Anzeige der Verkehrssituation erfolgt auf einem 3 m von der Versuchsperson entfernten Monitor, welcher 2 m breit und 1,5 m hoch ist und somit ein Sichtfeld von 37° horizontal und 30° vertikal erzeugt. Als Detektionsobjekte dienen neben einer 20 cm · 20 cm Graukarte als Referenz ein Gefahrenzeichen, eine Fußgängerin und ein Fahrzeug, welche sowohl in Graustufen als auch in Farbe dargestellt werden. Aus den dynamischen Versuchsfahrten wird sowohl die Detektionsdistanz als auch das Visibility Level VL zum Zeitpunkt der Detektion bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Detektionsleistung bei Verwendung der Referenzgraukarte mit der Detektionsleistung anderer natürlicher Hindernisse vergleichbar ist. Des Weiteren liegen die in der Studie ermittelten Detektionsentfernungen und die mit dem STV Modell berechneten Detektionsentfernungen nah beieinander, wenn der Berechnung ein Visibility Level von 7 zugrunde gelegt wird. [29]

DUMONT et al. [67] beschreiben einen kantenbasierten Visibility Level Berechnungsansatz als Erweiterung des objektbasierten Ansatzes für die Quantifizierung der erzeugten Sichtbedingungen für den Fahrzeugführer. Dieser Ansatz wertet die Leuchtdichteunterschiede an Objektkanten aus anstatt das gesamte Objekt und dessen Umgebung zu betrachten. Mit einem solchen Berechnungsansatz wäre es nach DUMONT et al. realisierbar, die Lichtverteilung von AFS-Systemen kamerabasiert an die Umgebungsbedingungen, wie zum Beispiel die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn anzupassen und somit verbesserte Detektionsbedingungen für den Fahrzeugführer zu schaffen. [67]

3.3.2. Detektion innerhalb geschlossener Ortschaften

Im Gegensatz zu nächtlichen Verkehrssituationen außerhalb geschlossener Ortschaften existiert im urbanen Verkehrsraum ein zusätzlicher Beitragsleister zur Beleuchtungssituation in Form von ortsfesten Straßenbeleuchtungssystemen. Ebenso wie im Falle der automobilen Beleuchtungstechnik werden die Minimal- und Maximalanforderungen an Straßenbeleuchtungssysteme durch Normen geregelt. So definiert die Europäische Norm 13201 (EN 13201) [61–65] verschiedene Beleuchtungsklassen für die verschiedenen Straßentypen, die in Städten auftreten. Je nachdem welcher Beleuchtungsklasse die jeweilige Straße entspricht, werden photometrische Maßzahlen, wie die mittlere Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} , Längsgleichmäßigkeit U_1 , Gesamtgleichmäßigkeit U_0 oder die Blendungsbegrenzungszahl TI vorgegeben. Die Straßen werden dabei grundsätzlich in die übergeordneten Straßenklassen M (Straßen für motorisierten Verkehr), C (Konfliktzonen) und P (Fußgängerstraßen) unterteilt. Ein Überblick über die photometrischen Anforderungen in den für den nächtlichen Straßenverkehr relevanten M-Klassen ist in Tabelle 3.7 gegeben. Die Anforderungen stellen dabei mit der Ausnahme des Blendbegrenzungswerts Minimalanforderungen dar. Beim Blendbegrenzungswert TI werden Maximalwerte vorgegeben [61–65].

Tabelle 3.7.: Photometrische Anforderungen für die M-Beleuchtungsklassen nach EN 13201 [62]

Klasse	L_{avg} in cd m^{-2}	U_0	U_1	TI in %
M1	2,00	0,40	0,70	10
M2	1,50	0,40	0,70	10
M3	1,00	0,40	0,60	15
M4	0,75	0,40	0,60	15
M5	0,50	0,35	0,40	15
M6	0,30	0,35	0,40	20

Die Einteilung von Straßen in die verschiedenen Beleuchtungsklassen erfolgt über Parameter, wie die Geschwindigkeit des Hauptnutzers, die Geometrie der Straße, den Verkehrsfluss oder die Umgebungseinflüsse [61]. Eine Berücksichtigung anderer beteiligter Lichtquellen wie beispielsweise Kfz-Scheinwerfern findet dabei nicht statt. Somit werden in den jeweiligen Regelungen für die ortsfeste Straßenbeleuchtung und die Kfz-Beleuchtung Anforderungen definiert, ohne den anderen Beitragsleister zu berücksichtigen. Dieser Umstand zeigt die fehlende Kommunikation zwischen den beiden Systemen auf [38].

Dabei erzeugt die Interaktion der ortsfesten Straßenbeleuchtung und der Kfz-Beleuchtung vor allem im urbanen Verkehrsraum eine große Breite an unterschiedlichen Beleuchtungssituationen, welche die Detektionsbedingungen und damit direkt die Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr innerhalb geschlossener Ortschaften beeinflussen [29–31, 117, 118].

Daher werden in diesem Abschnitt Untersuchungen beleuchtet, welche sich mit den Detektionsbedingungen im nächtlichen urbanen Verkehrsraum beschäftigen und die dabei auftretenden Besonderheiten untersuchen. Die Besonderheit ist, dass es in beleuchteten Straßen einen Übergang vom Negativ- zum Positivkontrast gibt. Dieser entsteht dadurch, dass die Straßenbeleuchtung ein Objekt, welches sich auf der Fahrbahn befindet, von oben anleuchtet und somit das Objekt dunkler erscheint als seine Umgebung. Durch das frontale Anleuchten des gleichen Objekts mit Kfz-Scheinwerfern verschwindet dieser vorhandene Negativkontrast und wandelt sich in einen Positivkontrast um, bei dem das Objekt heller erscheint als sein Umfeld (siehe Abbildung 3.21). [16, 17, 22, 40, 45, 56, 79, 170, 172–174]



Abbildung 3.21.: Kontrastübergang durch das Zusammenspiel der ortsfesten Straßenbeleuchtung und der Kfz-Beleuchtung innerhalb geschlossener Ortschaften; die Straßenbeleuchtung erzeugt einen sichtbaren Negativkontrast zwischen Objekt und Umgebung (links), durch die Kfz-Beleuchtung findet ein Übergang vom Negativkontrast zum Positivkontrast statt (rechts); heben sich die Einflüsse der Straßenbeleuchtung und der Kfz-Beleuchtung gegenseitig auf, so ist kein Kontrast zwischen Objekt und Umgebung vorhanden und eine Objektdetektion nicht möglich (mitte).

BULLOUGH und REA [40] untersuchen durch eine Simulationsstudie den Einfluss von Kfz-Scheinwerfern auf die Detektionsbedingungen in Abhängigkeit des von der ortsfesten Straßenbeleuchtung erzeugten Beleuchtungsniveaus auf der Fahrbahn. Hierzu wird eine Straßensituation mit einstellbaren Straßenbeleuchtungssystemen simuliert und die Sichtbarkeit von zwei Objekten auf der Fahrbahn, welche in Entfernungen von 60 ft (18,288 m) und 120 ft (36,576 m) vor dem Fahrzeug positioniert werden, berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl das Abblendlicht als auch das Fernlicht der Kfz-Scheinwerfer den höchsten Einfluss auf die Detektierbarkeit der Objekte bei ausgeschalteter Straßenbeleuchtung haben und dieser Einfluss mit steigendem Beleuchtungsniveau reduziert wird. [40]

In einer photometrischen Studie bezüglich der gegenseitigen Beeinflussung der ortsfesten Straßenbeleuchtung und der Abblendlichtfunktion von Kfz-Scheinwerfern berechnet BACELAR [16] das Visibility Level von Objekten (Durchmesser: 20 cm) auf der Fahrbahn in 40 m und 90 m Entfernung vor dem Fahrzeug. Die betrachteten Situationen sind dabei die ortsfeste Straßenbeleuchtung allein, die Kfz-Scheinwerfer allein und die Kombination aus Straßenbeleuchtung und Kfz-Scheinwerfern. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Straßenbeleuchtung allein bereits eine ausreichende Sichtbarkeit bietet und das zusätzliche Abblendlicht nicht zu einer Verbesserung der Sichtbarkeit beiträgt. Daraus schließt BACELAR, dass die Straßenbeleuchtung oder die Kfz-Scheinwerfer allein bessere Detektionsbedingungen zur Verfügung stellen als die Kombination aus Straßen- und Kfz-Beleuchtung. [16]

In einer weiteren Studie zeigen BACELAR et al. [17], dass es eine Korrelation zwischen dem berechneten Visibility Level und der Ergebnisse einer subjektiven Probandenbefragung zur Detektierbarkeit von Objekten gibt. Hierzu werden insgesamt 23 Versuchspersonen im Alter von 18 bis 55 Jahren gebeten ein Objekt in 83 m Entfernung zu betrachten und die Sichtbarkeit auf einer 5-stufigen Skala zu bewerten (siehe Tabelle 3.8). Aus den Ergebnissen dieser Studie schließt BACELAR, dass mindestens ein Visibility Level von 7 benötigt wird, um eine passable Sichtbarkeit von Objekten zu erreichen. [17]

Tabelle 3.8.: 5-stufige Skala für die subjektive Bewertung der Objektsichtbarkeit nach BACELAR [17]

Bewertungsstufe	Beschreibung
0	Objekt nicht sichtbar
1	Objekt schwach sichtbar
2	Passable Sichtbarkeit
3	Zufriedenstellende Sichtbarkeit
4	Gute Sichtbarkeit

BUYUKKINACI et al. [45] führen ebenfalls eine Studie durch, um das erforderliche Visibility Level VL für die Detektion von 20 cm · 20 cm großen Graukarten, welche auf 60 unterschiedlichen Positionen platziert werden und unterschiedliche Reflexionsgrade (0,20, 0,30, 0,40, 0,50) aufweisen, zu bestimmen. Hierzu werden 30 Versuchspersonen Aufnahmen einer beleuchteten Straßensituation mit unterschiedlichen Beleuchtungsklassen von M2 bis M5 und unterschiedlichen Farbtemperaturen von 4.000 K und 6.000 K präsentiert. Die Versuchspersonen haben dabei die Aufgabe, die Detektion der Graukarten zu signalisieren. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass für eine Detektionswahrscheinlichkeit von 100 % ein Visibility Level von 7 bis 8,5 benötigt wird. Des Weiteren wird kein Einfluss des Emissionsspektrums der Lichtquellen festgestellt. [45]

Eine dynamische Feldstudie mit 18 älteren (Alter ≥ 65 Jahre) und 18 jüngeren ($25 \leq \text{Alter} \leq 35$) Versuchspersonen wird von GIBBONS et al. [79] durchgeführt, um die Detektionsentfernung in Abhängigkeit der Adaptationsstufe und des Lichtquellenspektrums zu untersuchen. Hierfür werden fünf Adaptationsstufen ($0,07 \text{ cd m}^{-2}$, $0,10 \text{ cd m}^{-2}$, $0,20 \text{ cd m}^{-2}$, $0,30 \text{ cd m}^{-2}$ und $0,50 \text{ cd m}^{-2}$) und drei Lichtquellen (2.100 K Natriumdampf-Hochdrucklampe, 3.500 K LED und 6.000 K LED) verwendet. Die Detektionsobjekte in Form von Fußgängern werden links und rechts neben der Fahrbahn platziert. Die horizontalen Abstände zur Fahrerposition betragen dabei links 3,0 m und 7,7 m. Auf der rechten Seite beträgt der Abstand 8,9 m und 21,0 m. Die Versuchspersonen fahren die beleuchtete Strecke mit Geschwindigkeiten von 56 km h^{-1} und 80 km h^{-1} entlang und signalisieren die Detektion des jeweiligen Detektionsobjekts. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das Emissionsspektrum der Lichtquelle keinen signifikanten Einfluss auf die Detektionsentfernung hat. Die Adaptationsleuchtdichte hingegen hat einen Einfluss auf die Detektionsentfernung. So steigt die Detektionsentfernung, wenn die Adaptationsleuchtdichte erhöht wird. [79]

Die Untersuchung von BHAGAVATHULA et al. [22] hat das Ziel die Auswirkungen der Kfz-Beleuchtung auf die Erkennbarkeit von Objekten in unterschiedlichen Entfernungen auf beleuchteten Straßen zu beschreiben. Hierzu werden 18 cm · 18 cm Graukarten und Fußgänger als Detektionsobjekte auf verschiedenen Positionen auf der Straße verwendet und sowohl photometrische Messungen als auch Detektionstests mit Versuchspersonen durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Messungen ist ersichtlich, dass es je nach Entfernung vor dem Fahrzeug Übergänge vom Positiv- zum Negativkontrast und umgekehrt vom Negativ- zum Positivkontrast gibt. Die Ergebnisse der Detektionstests mit den Versuchspersonen zeigen, dass bei vorhandenem Negativkontrast die Detektionsentfernung größer ausfällt als bei einem Positivkontrast zwischen Objekt und Umfeld. Eine weitere Erkenntnis aus der Studie von BHAGAVATHULA et al. ist die Komplexität der Beziehung zwischen dem Kontrast und der Sichtbarkeit bei vertikal ausgedehnten Objekten wie Fußgängern, da diese wie in Abbildung 3.22 zu sehen, sowohl einen Positiv- als auch einen Negativkontrast aufweisen. [22]

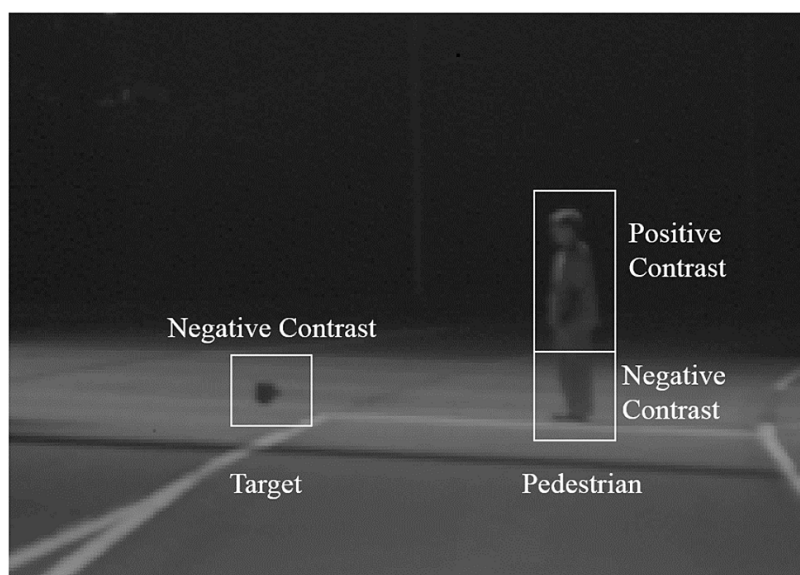


Abbildung 3.22.: Unterschied in der Kontrastverteilung von kleinen und vertikal ausgedehnten Objekten nach BHAGAVATHULA et al. [22].

VOGEL et al. [170] führen photometrische Messungen in einer beleuchteten Straße durch, um das Visibility Level für 20 cm · 20 cm Graukarten mit unterschiedlichen Reflexionsgraden ρ (0,15, 0,30, 0,50) in Abhängigkeit der Ausleuchtweite des Abblendlichts der Kfz-Scheinwerfer und der Beleuchtungskategorie der Straße (M3 bis M6) zu berechnen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die benötigte Ausleuchtweite sowohl von der Beleuchtungskategorie als auch vom Reflexionsgrad ρ der Objekte abhängt und in einem Bereich von 30 m bis 75 m einstellbar sein sollte. [170]

3.4. Abgeleitete Forschungsfragen

In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Abschnitten genutzt, um die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit abzuleiten und das Grundkonzept zur Realisierung situativ adaptiver Frontscheinwerferlichtverteilungen zu definieren.

3.4.1. Grundkonzept für situativ adaptive Scheinwerferlichtverteilungen

Wie in Kapitel 2 dargelegt, ist der große Vorteil von segmentierten ADB-Systemen, dass sie durch selektive Ausleuchtung des Fernlichtbereichs die Sichtweite erhöhen und gleichzeitig die Blendgefahr für andere Verkehrsteilnehmer auf das Abblendlichtniveau herabsenken. Dieses Beleuchtungskonzept wird in das Grundkonzept der vorliegenden Arbeit integriert. Da jedoch durch die stetig voranschreitende Urbanisierung die Verkehrsdichte im urbanen Verkehrsraum, in welchem das Fernlicht nicht nutzbar ist, deutlich ansteigt, wird für das Grundkonzept das segmentierte Fahrlicht, wie in Abbildung 3.23 dargestellt, deutlich in den Abblendlichtbereich gesenkt. Somit wird der Vorteil der selektiven Ausleuchtung im Abblendlichtbereich ebenfalls genutzt. Die Vorfeldausleuchtung wird durch ein Grundlicht realisiert. Das Grundkonzept der vorliegenden Arbeit sieht vor, dass sowohl die Komponenten des Grundlichts als auch des segmentierten Fahrlichts dimmbar realisiert werden und dadurch die Lichtstärken in den jeweiligen Bereichen adaptiv einstellbar sind.

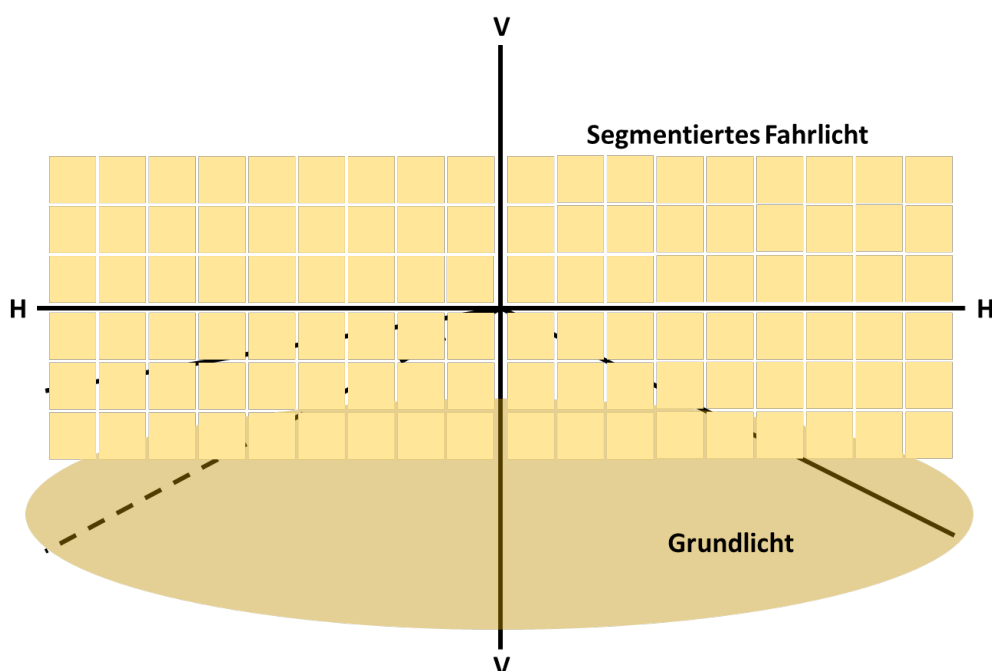


Abbildung 3.23.: Grundkonzept situativ adaptiver Lichtverteilungen; das System realisiert die Vorfeldausleuchtung mit einem Grundlicht und wird über ein segmentiertes Fahrlicht vervollständigt, welches die für die Detektion von relevanten Objekten im nächtlichen Straßenverkehr notwendigen Lichtstärken erzeugt und sich über den Abblend- und Fernlichtbereich erstreckt.

Um die absoluten Lichtstärken für die jeweiligen Bereiche zu definieren, sind zunächst die in den folgenden Abschnitten abgeleiteten Forschungsfragen zu beantworten.

3.4.2. Forschungsfragen zur Helligkeitswahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr

Aus dem Stand der Forschung geht hervor, dass eine höhere Fahrbahnleuchtdichte sowohl objektiv, durch verringerte Unfallwahrscheinlichkeiten, als auch subjektiv, durch ein erhöhtes Sicherheitsgefühl bei Fahrzeugführern und Fußgängern, zu einer allgemeinen Sicherheitserhöhung im nächtlichen Straßenverkehr führt. Bisherige Studien beschränken sich jedoch zum großen Teil auf die Analyse von Unfallstatistiken oder die empfundene Sicherheit von Fußgängern in beleuchteten Straßen im urbanen Verkehrsraum. Eine Betrachtung

der Fahrgeschwindigkeit auf die Helligkeitswahrnehmung von Fahrzeugführern oder der Interaktion der ortsfesten Straßenbeleuchtung mit den Kfz-Scheinwerfern fehlt an dieser Stelle. Für die Auslegung eines nach dem Grundkonzept in Abbildung 3.23 adaptiven Grundlichts sind demnach folgende Forschungsfragen zu beantworten.

1. Welcher Bereich im Fahrzeugvorfeld ist für die Helligkeitsbewertung von Fahrzeugführern relevant?
2. Hat die Fahrgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Helligkeitswahrnehmung von Fahrzeugführern?
3. Welche Mindestfahrbahnleuchtdichte ist im non-urbanen Verkehrsraum notwendig, um ein adäquates Sicherheitsgefühl bei Fahrzeugführern hervorzurufen?
4. Welche Mindestfahrbahnleuchtdichte ist im urbanen Verkehrsraum notwendig, um ein adäquates Sicherheitsgefühl bei Fahrzeugführern hervorzurufen?
5. Welchen Einfluss hat das durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung erzeugte Leuchtdichteniveau auf die notwendige Fahrbahnleuchtdichte?

3.4.3. Forschungsfragen zur Detektion im nächtlichen Straßenverkehr

Werden die bisherigen Untersuchungen zur Detektion im nächtlichen Straßenverkehr betrachtet, ist festzustellen, dass es bereits viele Laboruntersuchungen gibt, welche die Einflussparameter auf die Objektdetektion im mesopischen Bereich beschreiben. Des Weiteren existieren einige Felduntersuchungen im urbanen und non-urbanen Verkehrsraum, welche den Effekt von Kfz-Scheinwerfern auf die Detektionsbedingungen mit und ohne ortsfeste Straßenbeleuchtungssysteme untersuchen. Diese werden größtenteils dynamisch durchgeführt und eignen sich sehr gut für den Vergleich der Detektionsentfernungen bei Nutzung verschiedener Lichtverteilungen und Scheinwerfersysteme. Dynamische Untersuchungen haben jedoch gleichzeitig den Nachteil, dass bei jeder Testfahrt und Objektdetektion aufgrund des unterschiedlichen Abstands und Winkels zum Objekt keine vergleichbare und reproduzierbare Situation zwischen den einzelnen Testfahrten herrscht. Daher sind dynamische Untersuchungen zwar für die Validierung von Lichtverteilungen geeignet, für eine spatiale und absolute Auslegung des segmentierten Fahrlichts, wie in Abbildung 3.23 dargestellt, jedoch nicht nutzbar. Ähnlich verhält es sich mit den Studien zur Abstands- und Winkelabhängigkeit der Objektdetektion. Hier existieren ebenfalls Untersuchungen, die verschiedene Winkel oder Abstände betrachten. Untersuchungen, welche beide Parameter gerastert betrachten, fehlen. Daher sind für die Auslegung des segmentierten Fahrlichts, welches für die Detektionsbedingungen zuständig ist, folgende Forschungsfragen zu beantworten.

1. Welches Visibility Level wird für eine sichere Objektdetektion mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90 % benötigt?
2. Welchen Einfluss hat der Abstand und der Winkel zum Objekt auf das benötigte Visibility Level?
3. Wie beeinflusst die Interaktion von ortsfesten Straßenbeleuchtungssystemen und Kfz-Scheinwerfern und der damit einhergehende Übergang vom Negativ- zum Positivkontrast die Objektdetektion im urbanen Verkehrsraum?
4. Welche Kontrastpolarität (Positiv- oder Negativkontrast) ist im nächtlichen urbanen Verkehrsraum für die Objektdetektion zu bevorzugen?

Diese Forschungsfragen werden durch die nachfolgend erörterten Untersuchungen im urbanen und non-urbanen Verkehrsraum beantwortet.

4. Helligkeitswahrnehmung im Straßenverkehr

Um das Grundlicht für situativ adaptive Frontscheinwerferlichtverteilungen auszulegen, wird die Helligkeitswahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr als Kriterium herangezogen. Hierzu werden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen zur Ausdehnung des Grundlichtbereichs und zur erforderlichen Fahrbahnleuchtdichte durchgeführt. Die Untersuchungen werden dabei sowohl außerhalb als auch innerhalb geschlossener Ortschaften durchgeführt, um den Einfluss ortsfester Straßenbeleuchtungssysteme zu bestimmen.

Um die Fahrbahnelligkeit zu ändern, wird zuerst ein Testfahrzeug benötigt, welches Frontscheinwerfer aufweist, deren Lichtverteilungen in der Intensität variabel sind. Um solch ein Testfahrzeug zu realisieren, werden die kommerziell erhältlichen Standard LED-Scheinwerfer eines BMW 318d xDrive Touring so modifiziert, dass die Abblendlichtintensität über eine Ansteuerung mit einer 8 Bit-Pulsweitenmodulation (PWM) in diskreten Stufen von 0 (0 %) bis 255 (100 %) einstellbar ist. Abbildung 4.1 vermittelt einen Eindruck über die Intensitätsvariation, die mit den modifizierten Scheinwerfern im Abblendlicht erreicht werden.

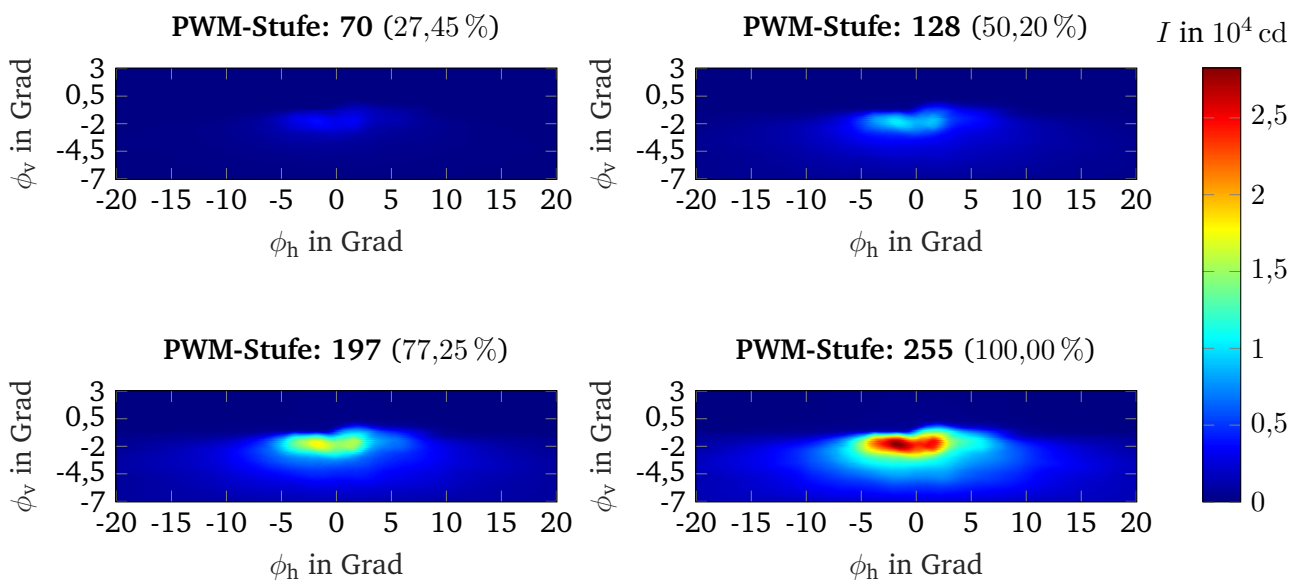


Abbildung 4.1.: Gedimmte Abblendlichtverteilungen des verwendeten LED-Scheinwerfers des BMW 318d xDrive Touring; durch die PWM-Dimmung ändert sich die absolute Intensität der Abblendlichtverteilung, die Lichtverteilung an sich bleibt von der Dimmung unberührt.

Bei Betrachtung der Lichtstärkeverteilungen des LED-Scheinwerfers ist festzustellen, dass die PWM-Dimmung die absoluten Lichtstärkewerte der gesamten Lichtverteilung ändern. Dabei ändert sich die ursprüngliche Lichtverteilung nicht. Eine Beeinflussung der Lichtverteilung auf der Fahrbahn durch die PWM-Dimmung

ist somit auszuschließen. Sowohl für die Untersuchungen zur Helligkeitswahrnehmung als auch für die Detektionsstudien, welche in Kapitel 5 beschrieben werden, wird das gleiche Testfahrzeug verwendet.

4.1. Außerhalb geschlossener Ortschaften

Das Ziel der Untersuchung zur Helligkeitswahrnehmung außerhalb geschlossener Ortschaften ist die Bestimmung des für die Helligkeitswahrnehmung relevanten Bereichs vor dem Fahrzeug. Des Weiteren wird mit der durchgeführten Untersuchung eine Aussage über die für ein adäquates Sicherheitsgefühl notwendige Fahrbahnleuchtdichte im relevanten Bereich getroffen und der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Helligkeitswahrnehmung untersucht.

4.1.1. Studienkonzept

Die Studie, welche eine statische und eine dynamische Untersuchung beinhaltet, wird bei Dunkelheit auf einem abgesperrten Testgelände ohne ortsfeste Straßenbeleuchtungssysteme durchgeführt, um eine nächtliche Verkehrssituation außerhalb geschlossener Ortschaften nachzubilden. Vor der eigentlichen Studiendurchführung werden mit einer Leuchtdichtemesskamera die Fahrbahnleuchtdichten bei den einzelnen PWM-Dimmstufen gemessen, um den PWM-Dimmstufen Fahrbahnleuchtdichten zuzuordnen.

Im statischen Teil der Studie wird sowohl die Helligkeitswahrnehmung der Versuchspersonen als auch der für die Helligkeitswahrnehmung relevante Bereich im Fahrzeugvorfeld untersucht. Hierzu wird das Fahrzeugvorfeld, wie in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt, in Anlehnung an die Untersuchungen von KLEINKES [103] und KOBBERT [105] in drei Bereiche unterteilt. Dabei wird durch den „Bereich 1“, welcher sich bis zu einer Entfernung von 20 m vor dem Fahrzeug erstreckt, das Nahfeld beschrieben. Den Mittelfeldbereich bildet der von 20 m bis 32 m reichende „Bereich 2“. Ab 32 m vor dem Fahrzeug beginnt der als Fernfeld bezeichnete „Bereich 3“.

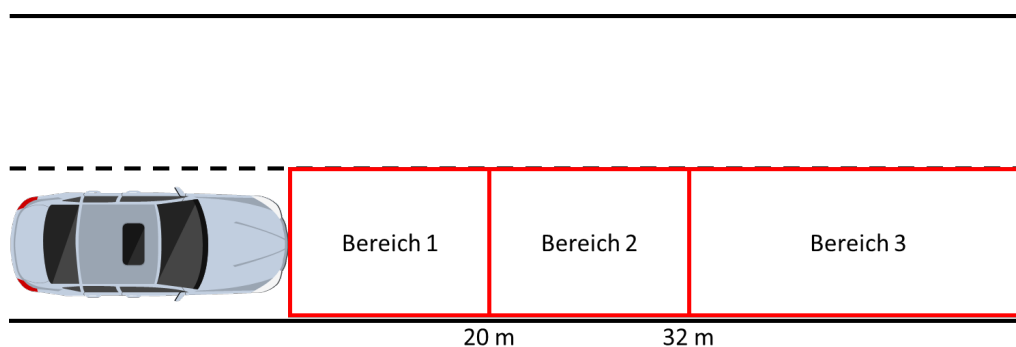


Abbildung 4.2.: Versuchsaufbau für die Untersuchungen der für die Helligkeitswahrnehmung relevanten Bereiche; das Vorfeld wird in Anlehnung an Studien und Ergebnisse von KLEINKES [103] und KOBBERT [105] in drei Bereiche unterteilt, das Nahfeld (Bereich 1) erstreckt sich bis zu einer Entfernung von 20 m vor dem Fahrzeug, der Mittelfeldbereich (Bereich 2) reicht von 20 m bis 32 m, ab 32 m beginnt das Fernfeld (Bereich 3).

Im realen Versuchsaufbau werden die Grenzen der einzelnen Bereiche durch Verkehrspylen abgesteckt. Dies ermöglicht die Auswertung der Fahrbahnleuchtdichten in diesen Bereichen aus den aufgezeichneten

Leuchtdichtebildern. In Abbildung 4.3 ist ein aufgezeichnetes Leuchtdichtebild mit den eingezeichneten Bereichen exemplarisch für die höchste PWM-Dimmstufe von 255 dargestellt.

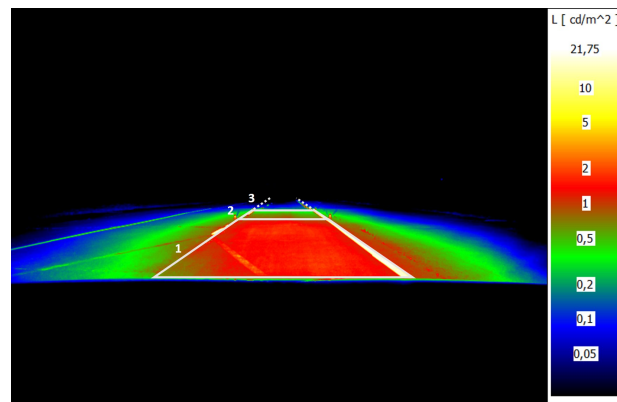


Abbildung 4.3.: Leuchtdichtebild der statischen Helligkeitsuntersuchung außerhalb geschlossener Ortschaften bei der PWM-Stufe 255; die definierten Vorfeldbereiche sind zur Veranschaulichung durch die weißen Bereiche im Leuchtdichtebild markiert.

Die Studie beginnt für die Versuchspersonen mit einer Adaptationsphase von 15 min, welche dafür genutzt wird den Versuchspersonen den Gegenstand und die Durchführung der Studie zu erklären. Im Anschluss an die Adaptationsphase beginnt der statische Teil der Studie, welcher wie folgt abläuft.

Im ersten Teil der statischen Studie werden die Versuchspersonen gebeten, die in zufälliger Reihenfolge dargebotenen Fahrbahnhelligkeitsstufen nach ihrem Helligkeitseindruck zu bewerten. Die Bewertung des Helligkeitseindrucks erfolgt dabei anhand einer 5-stufigen Ordinalskala von „1 - sehr dunkel“ bis „5 - sehr hell“. Die Bewertungsstufe „3“ repräsentiert eine „neutrale“ Bewertung, bei der die Vorfeldausleuchtung weder als „2 - dunkel“ noch als „4 - hell“ wahrgenommen wird. Des Weiteren werden die Versuchspersonen bei jeder Fahrbahnhelligkeitsstufe gefragt, ob sie bei der eingestellten Fahrbahnhelligkeit bereit wären das Fahrzeug zu fahren. Falls diese Frage mit „Nein“ beantwortet wird, entspricht dies einer Bewertung von „0 - nicht geeignet für ein ausreichendes Sicherheitsgefühl“. Insgesamt werden auf diese Weise zwölf randomisiert präsentierte Fahrbahnhelligkeitsstufen durch die 23 Versuchspersonen (fünf weiblich, 18 männlich) im Altersbereich von 22 bis 37 Jahren bewertet.

Im Anschluss an die statische Helligkeitsbewertung der Vorfeldausleuchtung findet die Relevanzbewertung der Vorfeldbereiche statt. Hierzu werden die Versuchspersonen gebeten, jeden der 3 Bereiche auf einer Schulnotenskala von „1“ bis „5“ nach ihrer Relevanz für die zuvor abgegebene Helligkeitsbewertung zu benoten. Die Note „1“ entspricht dabei der Aussage „Sehr wichtig für meine Helligkeitsbewertung“ und die Note „5“ der Aussage „Überhaupt nicht wichtig für meine Helligkeitsbewertung“. Sowohl bei der Helligkeitsbewertung als auch bei der Relevanzbenotung haben die Versuchspersonen die Möglichkeit Zwischenbewertungen abzugeben.

Mit der Relevanzbewertung der Vorfeldbereiche endet der statische Teil der Studie und der dynamische Fahrversuch beginnt. Hierfür fahren die Versuchspersonen selbst das Testfahrzeug auf einem 800 m langen geraden Streckenabschnitt des abgesperrten Testgeländes, welcher zwei Fahrspuren mit einer Fahrspurbreite von jeweils 3,50 m aufweist. Der dynamische Fahrversuch ist dabei zweigeteilt. So werden erst Versuchsfahrten mit einer Fahrgeschwindigkeit v von konstant 30 km h^{-1} durchgeführt und anschließend die Fahrgeschwindigkeit auf konstant 60 km h^{-1} erhöht. Die Nutzung des Tempomats stellt dabei die konstante Fahrgeschwindigkeit sicher. Im Gegensatz zur statischen Studie werden bei den dynamischen Versuchsfahrten sechs der ursprünglich verwendeten zwölf Fahrbahnhelligkeitsstudien für die Helligkeitsbewertung herangezogen und den Versuchspersonen randomisiert präsentiert, um die Gesamtstudiendauer zu reduzieren und so das Risiko

einer Ermüdung der Versuchspersonen zu verringern. Somit werden für die zwei Fahrgeschwindigkeiten und sechs Fahrbahnhelligkeitsstufen insgesamt zwölf Versuchsfahrten durchgeführt. Nach jeder Versuchsfahrt bewerten die gleichen 23 Versuchspersonen auf der gleichen Bewertungsskala wie im statischen Versuchsteil ihren Helligkeitseindruck von der Vorfeldausleuchtung. Erneut ist die Bewertung mit der Bewertungsstufe „0 - nicht geeignet für ein ausreichendes Sicherheitsgefühl“ für die Versuchspersonen wählbar, falls die eingestellte Fahrbahnhelligkeitsstufe nicht zu einem ausreichenden Sicherheitsgefühl für das Führen des Testfahrzeugs führt. Eine Relevanzbewertung findet im dynamischen Versuchsteil nicht statt. In Tabelle 4.1 ist eine Übersicht über die Teiluntersuchungen der durchgeführten Studie dargestellt.

Tabelle 4.1.: Übersicht der Studie zur Helligkeitswahrnehmung außerhalb geschlossener Ortschaften

v in km h^{-1}	Untersuchungsgegenstand	unabhängige Variable
0	Relevanz der Vorfeldbereiche	3 Vorfeldbereiche
0	Helligkeitsbewertung	12 Helligkeitsstufen
30	Helligkeitsbewertung	6 Helligkeitsstufen
60	Helligkeitsbewertung	6 Helligkeitsstufen

4.1.2. Ergebnisse

Die Auswertung der Studienergebnisse beginnt mit der Analyse der aufgezeichneten Leuchtdichtebilder. Hierzu werden die durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} in den drei Vorfeldbereichen an den fünf aufeinanderfolgenden Studienabenden ausgewertet, welche nach KLEINKES [103] und DAMASKY [56] als Adaptationsleuchtdichte für die zwölf verschiedenen PWM-Stufen angenommen werden. In Abbildung 4.4 sind die über die fünf Versuchsabende gemittelten durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichten der drei Vorfeldbereiche mit den dazugehörigen Standardabweichungen dargestellt.

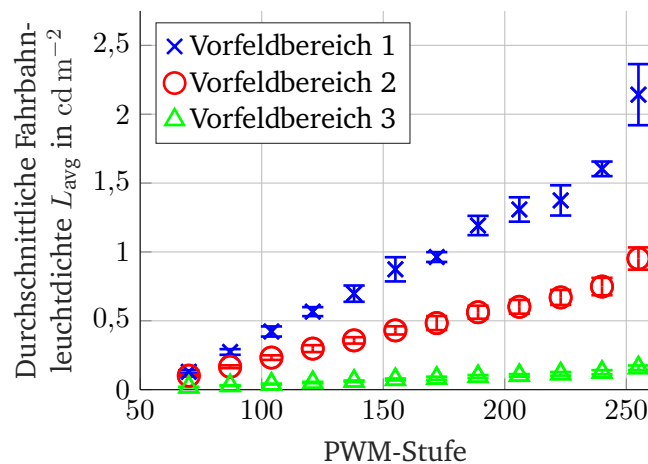


Abbildung 4.4.: Durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichten in den drei Vorfeldbereichen in Abhängigkeit der eingestellten PWM-Stufe des LED-Abblendlichts; die Marker stellen die über die fünf Versuchsabende gemittelten Fahrbahnleuchtdichten in Bereich 1 (blaue Kreuze), Bereich 2 (rote Kreise) und Bereich 3 (grüne Dreiecke) und die dazugehörigen Standardabweichungen als Antennen dar.

Aus Abbildung 4.4 wird deutlich, dass die Standardabweichung der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte in den drei Vorfeldbereichen, welche über fünf Versuchsabende gemittelt wird, gering ausfällt. Daher wird in

der weiteren Auswertung der Mittelwert der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte verwendet.

Im nächsten Schritt werden die Verläufe der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte in den verschiedenen Vorfeldbereichen gegenübergestellt, um zu überprüfen ob die Änderung der Helligkeitsstufe unterschiedliche Auswirkungen auf die drei Vorfeldbereiche hat. Das Ergebnis dieser Gegenüberstellung ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

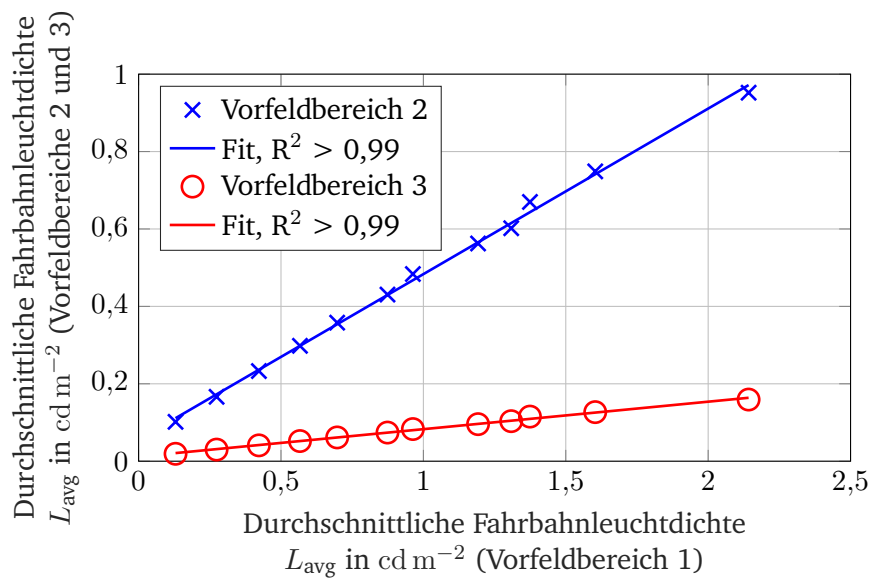


Abbildung 4.5.: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichten in den drei Vorfeldbereichen; die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte sowohl im Vorfeldbereich 2 als auch im Vorfeldbereich 3 weisen eine lineare Korrelation mit der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte im Vorfeldbereich 1 auf, das Bestimmtheitsmaß R^2 ist in beiden Fällen größer als 0,99.

Wie in Abbildung 4.5 zu sehen, ist die Korrelation zwischen den einzelnen Vorfeldbereichen durch eine lineare Regression beschreibbar. Dies wird durch die Analyse mithilfe des Pearson'schen Korrelationskoeffizienten ρ_p bestätigt. Diese ergibt eine statistisch signifikante lineare Beziehung zwischen der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte sowohl für Bereich 2 und Bereich 1 ($\rho_p = 0,999$, p -Wert $< 0,001$, $R^2 > 0,99$) als auch für Bereich 3 und Bereich 1 ($\rho_p = 0,998$, p -Wert $< 0,001$, $R^2 > 0,99$). Somit gelten die Auswertungsergebnisse für einen der drei Vorfeldbereiche analog für die beiden anderen Vorfeldbereiche mit unterschiedlichen Absolutwerten für die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte. [71]

Als nächstes werden die Ergebnisse der Probandenbefragung zur Relevanz der drei Vorfeldbereiche für die Helligkeitsbewertung betrachtet. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Abbildung 4.6 als Boxplot dargestellt. Dabei stellen die jeweiligen Boxplots die Medianwerte und die Quantile der Relevanzbenotung durch die Versuchspersonen für die jeweiligen Vorfeldbereiche dar.

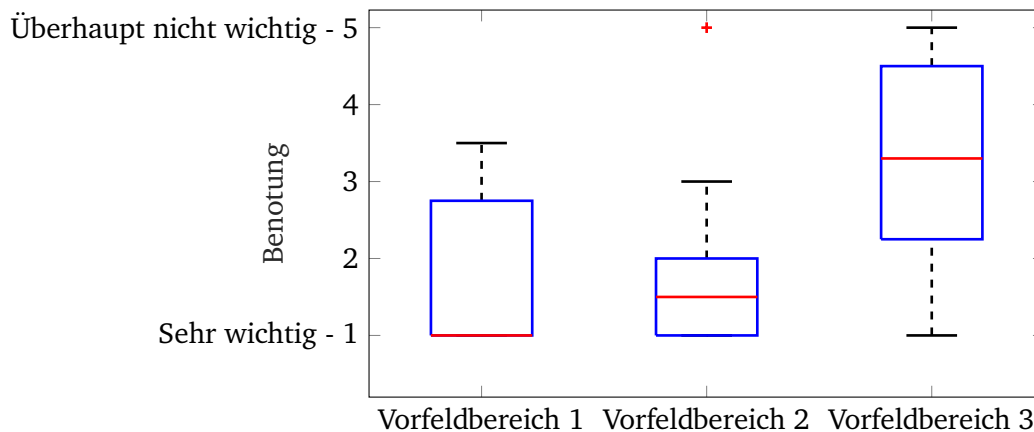


Abbildung 4.6.: Ergebnisse der Relevanzbenotung für die drei Vorfeldbereiche; während die Vorfeldbereiche 1 und 2 für die Helligkeitsbewertung als ähnlich relevant eingestuft werden, wird der Vorfeldbereich 3 als weniger relevant bewertet.

Aus Abbildung 4.6 ist festzustellen, dass die Versuchspersonen den Vorfeldbereich 3 als weniger wichtig für die Helligkeitsbewertung einstufen als die anderen beiden Vorfeldbereiche. Die Analyse der Daten mit einem Friedman-Test zeigt, dass es signifikante Unterschiede in den Probandenbewertungen bezüglich der Relevanz der drei Vorfeldbereiche gibt (p -Wert $< 0,001$). Daher wird ein post hoc Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test durchgeführt, um die Vorfeldbereiche zu bestimmen, zwischen denen signifikante Unterschiede in den Probandenbewertungen auftreten. Für die Durchführung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests wird eine Bonferroni-Korrektur durchgeführt, welche eine Anpassung des Signifikanzniveaus von 0,05 auf $\alpha_B = 0,0167$ zur Folge hat. Der Test zeigt, dass es sowohl bei den Relevanzbewertungen zwischen dem Vorfeldbereich 3 und dem Vorfeldbereich 1 (p -Wert $< 0,001$) als auch zwischen dem Vorfeldbereich 3 und Vorfeldbereich 2 (p -Wert $< 0,001$) einen statistisch signifikanten Effekt gibt. Werden die Relevanzbewertungen in den beiden Vorfeldbereichen 1 und 2 betrachtet, so ist kein signifikanter Effekt festzustellen (p -Wert = 0,523). [71] Daraus lässt sich schließen, dass der relevante Bereich für die Helligkeitswahrnehmung von Fahrzeugführern die beiden Vorfeldbereiche 1 und 2 beinhaltet und sich somit bis zu einer Entfernung von 32 m erstreckt, während das dahinterliegende Fernfeld (ab 32 m Entfernung) weniger relevant für die Helligkeitswahrnehmung ist. Aus diesem Grund ergibt sich der Auswertungsbereich für die Helligkeitsbewertungen der Versuchspersonen aus der Kombination der beiden Vorfeldbereiche 1 und 2. Die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} in diesem kombinierten Bereich wird durch die Auswertung der aufgezeichneten Leuchtdichtebilder bei den verschiedenen PWM-Stufen bestimmt.

Die Auswertung der Helligkeitsbewertungen beginnt mit der Auswertung der Medianwerte für die wahrgenommene Fahrbahnhelligkeit bei den verschiedenen Fahrbahnleuchtdichten im kombinierten Vorfeldbereich bis 32 m vor dem Testfahrzeug. Zunächst wird überprüft, ob zwischen der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} und dem Median der Helligkeitsbewertungen eine signifikante Korrelation besteht. Hierfür wird der Spearman'sche Korrelationskoeffizient ρ_S für die drei Fahrgeschwindigkeiten 0 km h^{-1} (statischer Fall), 30 km h^{-1} und 60 km h^{-1} bestimmt. Die zugehörigen Korrelationskoeffizienten ρ_S und p -Werte sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. [71]

Tabelle 4.2.: Korrelationskoeffizienten ρ_S und p -Werte für die Überprüfung der signifikanten Korrelation zwischen der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte und dem Median der Helligkeitsbewertung außerhalb geschlossener Ortschaften

v in km h^{-1}	ρ_S	p -Wert
0	0,94	0,0167
30	0,85	0,0491
60	0,99	0,0056

Anhand der bestimmten Korrelationskoeffizienten und p -Werte in Tabelle 4.2 ist festzustellen, dass bei allen drei Fahrgeschwindigkeiten eine signifikant positive Korrelation bezogen auf das Signifikanzniveau von 0,05 existiert [71]. Um diese Korrelation näher zu betrachten, wird im nächsten Schritt in Anlehnung an das Weber-Fechner Gesetz [70, 179] eine logarithmische Fitfunktion gewählt um die Abhängigkeit der Helligkeitsbewertung von der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte im Vorfeldbereich bis 32 m zu beschreiben (siehe Gleichung 4.1).

$$f(x) = a \cdot \log(x) + b \quad (4.1)$$

In Abbildung 4.7 sind sowohl die Daten als auch die zugehörigen Fitfunktionen dargestellt. Dabei sind die Ergebnisse für die statische Untersuchung (0 km h^{-1}) in blau, für die Fahrgeschwindigkeit von 30 km h^{-1} in rot und für 60 km h^{-1} in grün dargestellt.

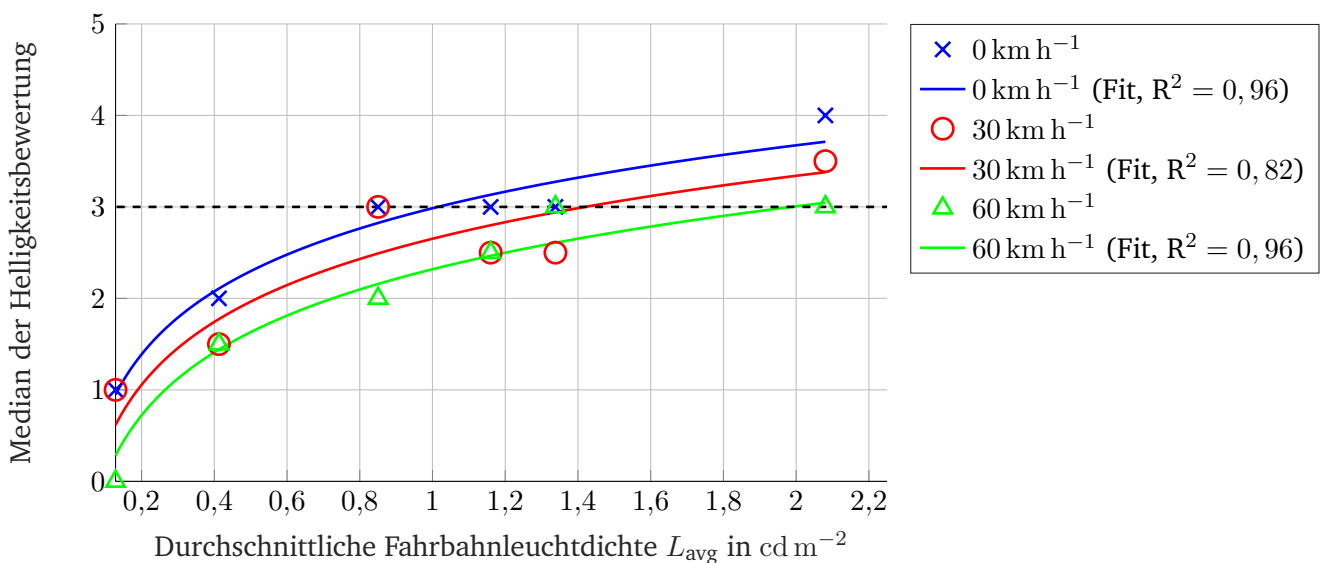


Abbildung 4.7.: Median der Helligkeitsbewertung in Abhängigkeit der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten; bei allen drei Geschwindigkeiten folgt die Helligkeitsbewertung mit steigender Fahrbahnleuchtdichte dem Weber-Fechner Gesetz, des Weiteren ist festzustellen, dass die gleiche Fahrbahnleuchtdichte bei höheren Fahrgeschwindigkeiten dunkler wahrgenommen wird.

Aus Abbildung 4.7 wird deutlich, dass die Helligkeitsbewertung der Versuchspersonen in Abhängigkeit der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} dem Weber-Fechner Gesetz folgt. Das Bestimmtheitsmaß für die

zugehörige logarithmische Fitfunktion ist bei allen Fahrgeschwindigkeiten größer als 0,8. Des Weiteren folgt aus Abbildung 4.7, dass die gleiche durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte bei höheren Geschwindigkeiten dunkler wahrgenommen wird als bei geringeren Fahrgeschwindigkeiten oder im statischen Fall.

Für die weitere Betrachtung der Helligkeitsbewertung werden zwei Schwellen definiert. Die erste Schwelle ist die Mindestfahrbahnleuchtdichte für ein ausreichend sicheres Gefühl der Versuchspersonen um das Fahrzeug zu führen. Diese wird über die Probandenantworten auf die Frage des subjektiven Sicherheitsgefühls bei der gegebenen Fahrbahnleuchtdichte bestimmt. So werden durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} im Vorfeldbereich bis 32 m vor dem Fahrzeug erst dann als akzeptabel eingestuft, wenn mindestens 90 % der Versuchsperson die Frage zum subjektiven Sicherheitsgefühl mit „Ja“ beantworten. Für den statischen Fall beträgt diese Mindestfahrbahnleuchtdichte $0,269 \text{ cd m}^{-2}$. Für die beiden Fahrgeschwindigkeiten von 30 km h^{-1} und 60 km h^{-1} ist mindestens eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte von $0,413 \text{ cd m}^{-2}$ notwendig, um ein ausreichendes Sicherheitsgefühl bei 90 % der Versuchspersonen zu erreichen.

Die zweite Schwelle beschreibt den Übergang von einer sicherheitsförderlichen Vorfeldausleuchtung zu einer komfortablen Vorfeldausleuchtung. Diese Schwelle wird am „neutralen“ Übergangspunkt der Helligkeitsbewertung bestimmt (Bewertungsstufe 3 in Abbildung 4.7), da der Median der Helligkeitsbewertung ab dieser Schwelle im „hellen“ Bereich der Helligkeitsbewertung liegt. Diese Schwelle wird ebenfalls durch die Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Dabei wird im statischen Fall diese Schwelle durch eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte von etwa $1,0 \text{ cd m}^{-2}$ markiert. Diese Schwelle entspricht der von KLEINKES [103] empfohlenen Fahrbahnleuchtdichte und ist somit in der Lage das Ergebnis der von KLEINKES durchgeführten statischen Studie im Lichtkanal zu bestätigen. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten wird eine höhere Fahrbahnleuchtdichte benötigt, um in den Komfortbereich überzugehen. So ist bei einer Fahrgeschwindigkeit von 30 km h^{-1} eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von etwa $1,4 \text{ cd m}^{-2}$ notwendig, um vom Sicherheitsbereich in den Komfortbereich überzugehen. Bei 60 km h^{-1} ist eine weitere Erhöhung der Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} im Vorfeldbereich bis 32 m auf etwa $2,0 \text{ cd m}^{-2}$ erforderlich, um die „neutrale“ Bewertungsstufe zu erreichen.

Um den Geschwindigkeitseinfluss auf die Helligkeitsbewertung weiter zu untersuchen, werden die Helligkeitsbewertungen bei den sechs Fahrbahnleuchtdichten, welche sowohl im statischen als auch dynamischen Fall untersucht werden, und den drei Fahrgeschwindigkeiten auf statistische Signifikanz überprüft. So zeigt der auf die Helligkeitsbewertung der Versuchspersonen angewendete Friedman-Test, dass es einen signifikanten Effekt der Fahrgeschwindigkeit auf die Helligkeitsbewertung bei allen der sechs betrachteten Fahrbahnleuchtdichten gibt. Die durch den Friedman-Test berechneten p -Werte für die einzelnen Fahrbahnleuchtdichten sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. [71]

Tabelle 4.3.: Durch den Friedman-Test berechnete p -Werte für den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Helligkeitsbewertung; Bei allen Fahrbahnleuchtdichten ergibt sich ein signifikanter Geschwindigkeitseinfluss bezogen auf das Signifikanzniveau von 0,05

L_{avg} in cd m^{-2}	p -Wert
0,13	$2,05 \cdot 10^{-5}$
0,41	$2,80 \cdot 10^{-3}$
0,85	$3,80 \cdot 10^{-6}$
1,16	$1,93 \cdot 10^{-2}$
1,34	$1,04 \cdot 10^{-4}$
2,08	$3,49 \cdot 10^{-4}$

Erneut wird ein post hoc Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test mit Bonferroni-Korrektur ($\alpha_B = 0,0167$) durchgeführt, um die drei Fahrgeschwindigkeiten v untereinander auf signifikante Unterschiede zu überprüfen (p -Werte siehe Tabelle 4.4). [71]

Tabelle 4.4.: Durch den post hoc Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test berechnete p -Werte für den paarweisen Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten v auf die Helligkeitsbewertung bei den verschiedenen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} ; p -Werte, welche kleiner als das korrigierte Signifikanzniveau $\alpha_B = 0,0167$ sind, weisen auf Fahrbahnleuchtdichten hin, bei denen ein signifikanter Unterschied zwischen den verglichenen Geschwindigkeiten besteht, und sind mit einem „*“ gekennzeichnet

L_{avg} in cd m^{-2}	Verglichene Geschwindigkeiten		
	$0 \text{ km h}^{-1} \leftrightarrow 30 \text{ km h}^{-1}$	$30 \text{ km h}^{-1} \leftrightarrow 60 \text{ km h}^{-1}$	$0 \text{ km h}^{-1} \leftrightarrow 60 \text{ km h}^{-1}$
	p -Wert	p -Wert	p -Wert
0,13	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$9,77 \cdot 10^{-4*}$	$5,84 \cdot 10^{-5*}$
0,41	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$4,30 \cdot 10^{-1}$	$1,20 \cdot 10^{-3*}$
0,85	$1,89 \cdot 10^{-1}$	$7,33 \cdot 10^{-5*}$	$1,80 \cdot 10^{-3*}$
1,16	$1,29 \cdot 10^{-2*}$	$1,31 \cdot 10^{-1}$	$4,60 \cdot 10^{-3*}$
1,34	$1,89 \cdot 10^{-4*}$	$9,67 \cdot 10^{-2}$	$1,40 \cdot 10^{-3*}$
2,08	$2,04 \cdot 10^{-1}$	$5,21 \cdot 10^{-4*}$	$4,63 \cdot 10^{-4*}$

Aus Tabelle 4.4 wird deutlich, dass bei allen betrachteten Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} zwischen dem statischen Fall (0 km h^{-1}) und der Fahrgeschwindigkeit v von 60 km h^{-1} ein signifikanter Unterschied in den Helligkeitsbewertungen der Versuchspersonen vorhanden ist. Bei der Betrachtung des Vergleichs zwischen dem statischen Fall und der Fahrgeschwindigkeit v von 30 km h^{-1} ist lediglich bei den durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} von $1,16 \text{ cd m}^{-2}$ und $1,34 \text{ cd m}^{-2}$ ein signifikanter Unterschied zwischen den Helligkeitsbewertungen festzustellen. Zwischen den Fahrgeschwindigkeiten v von 30 km h^{-1} und 60 km h^{-1} besteht bei den Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} $0,13 \text{ cd m}^{-2}$, $0,85 \text{ cd m}^{-2}$ und $2,08 \text{ cd m}^{-2}$ ein signifikanter Unterschied in den Helligkeitsbewertungen. Somit ist insgesamt von einem signifikanten Einfluss der Fahrgeschwindigkeit v auf die Helligkeitswahrnehmung bei verschiedenen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} auszugehen.

Zusätzlich zu der dargestellten Analyse der Medianwerte zur Bestimmung der relevanten Leuchtdichteschwellen und des Einflusses der Fahrgeschwindigkeit v auf die Helligkeitswahrnehmung wird eine tiefergehende Analyse der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte für die Steigerung des Komfortgefühls der Fahrzeugführer in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit v durchgeführt. Hierzu wird die bereits beschriebene 5-stufige Ordinalskala auf eine Nominalskala reduziert, indem lediglich zwischen Bewertungen für „dunkel“ (Bewertungen < 3) und „hell“ (Bewertungen ≥ 3) unterschieden wird. Aus diesen Bewertungsdaten wird der Anteil der 23 Versuchspersonen berechnet, welcher die jeweilige Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} bei den verschiedenen Geschwindigkeiten als „hell“ bewertet hat. Die Datenanalyse erfolgt durch die Anwendung der logistischen Regression mit der psychometrischen Funktion nach LINSCHOTEN et al. [114] (siehe Gleichung 4.2).

$$P(x) = \gamma + (1 - \gamma) \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{-\beta}} \quad (4.2)$$

Diese Funktion wird durch drei Parameter charakterisiert, wobei α den 50%-Schwellwert beschreibt. In dem betrachteten Fall wird über den Parameter α die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte beschrieben, bei der die Hälfte der Versuchspersonen die Vorfeldausleuchtung als „hell“ bewerten. Der Parameter β beschreibt die Steilheit der Kurve und γ gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass eine positive Antwort rein zufällig auftritt.

Da dieser Fall bei der durchgeführten Studie anhand der dargebotenen Reize ausgeschlossen wird, wird der Wert für γ auf „0“ gesetzt und die Fitfunktion, wie in Gleichung 4.3 gezeigt, vereinfacht.

$$P_{\gamma=0}(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{-\beta}} \quad (4.3)$$

Die Verwendung der psychometrischen Funktion bietet den Vorteil, dass die notwendigen Fahrbahnleuchtdichten für bestimmte Wahrscheinlichkeiten p ermittelbar sind, obwohl diese durch die Datenlage nicht erreicht werden. Die Auswertung der verschiedenen Testbedingungen mit der psychometrischen Funktion ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse für den statischen Versuch erneut in blau und die Ergebnisse für die Fahrgeschwindigkeiten von 30 km h^{-1} in rot und für 60 km h^{-1} in grün dargestellt.

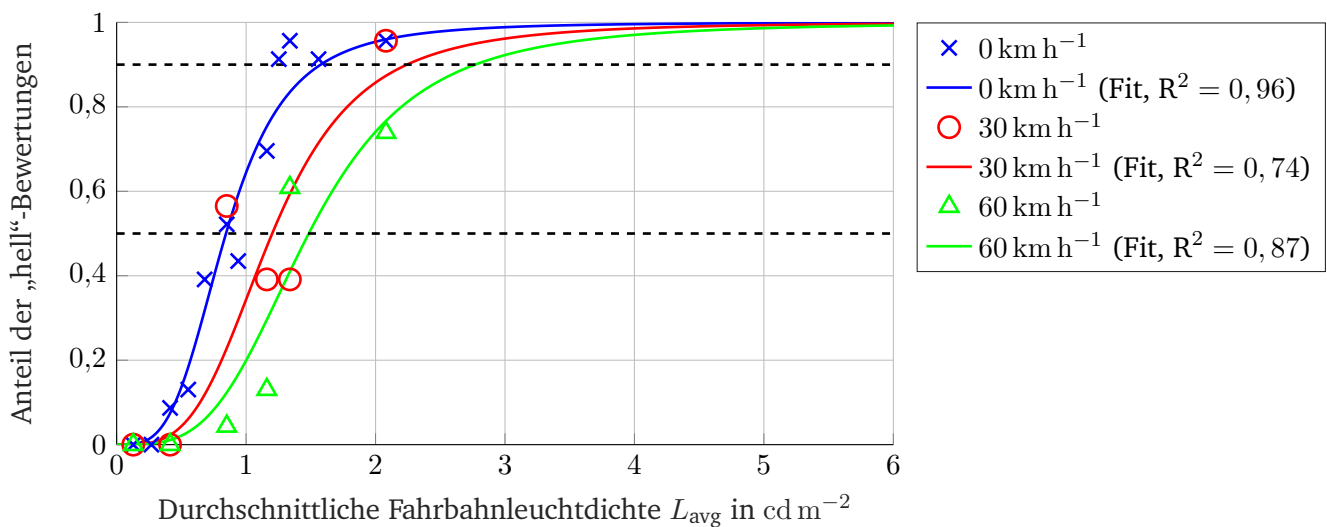


Abbildung 4.8.: Anteil der „hell“-Bewertungen bei verschiedenen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} und Geschwindigkeiten v ; mit steigender Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} steigt die Wahrscheinlichkeit p einer „hell“-Bewertung, wird die Fahrgeschwindigkeit v erhöht, so ist auch die Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} zu erhöhen um die gleiche Wahrscheinlichkeit p für eine „hell“-Bewertung zu erhalten.

Abbildung 4.8 zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für eine „hell“-Bewertung mit der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} steigt. Somit wird der zuvor in Abbildung 4.7 gezeigte Trend durch die Ergebnisse der Auswertung mit der logistischen Regression bestätigt. Ebenfalls wird der Einfluss der Geschwindigkeit durch die logistische Regression bestätigt. So sind bei höheren Fahrgeschwindigkeiten v höhere durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichten notwendig, um die gleiche Wahrscheinlichkeit p für eine „hell“-Bewertung der Vorfeldausleuchtung bis 32 m zu erhalten.

Den Abschluss der Datenauswertung der Studie zur Helligkeitswahrnehmung bildet die Bestimmung der notwendigen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} für bestimmte Wahrscheinlichkeiten p von „hell“-Bewertungen in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit v . Hierzu werden die Fahrbahnleuchtdichten bei den drei untersuchten Fahrgeschwindigkeiten aus Abbildung 4.8 für die Wahrscheinlichkeiten von 50 % und 90 % extrahiert und mittels linearer Regression die Fahrbahnhelligkeiten für weitere Fahrgeschwindigkeiten bestimmt. Die Ergebnisse der linearen Regression sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

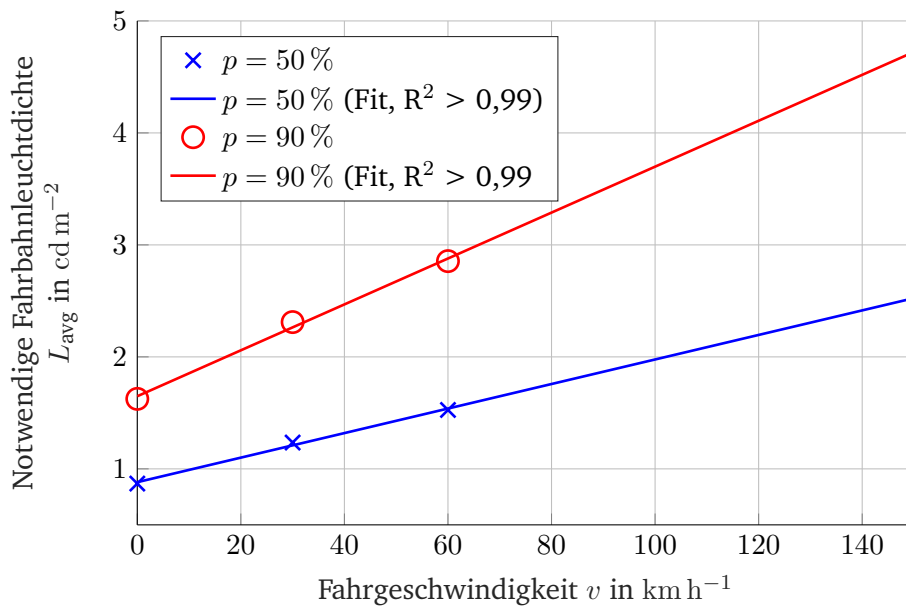


Abbildung 4.9.: Benötigte Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit v ; bei Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit v sind höhere Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} notwendig, um die gleiche Wahrscheinlichkeit p für eine „hell“-Bewertung zu erreichen.

Aus Abbildung 4.9 ist festzustellen, dass die lineare Regression für beide Wahrscheinlichkeiten p eine gute Beschreibung des Verlaufs der vorhandenen Daten liefert. So wird deutlich, dass sowohl mit steigender Fahrgeschwindigkeit v als auch mit steigender Wahrscheinlichkeit für „hell“-Bewertungen die Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} zu erhöhen ist. Tabelle 4.5 fasst unter der Annahme der linearen Regression die notwendigen Fahrbahnleuchtdichten für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten bei gewünschten Wahrscheinlichkeiten p von 50 % und 90 % zusammen.

Tabelle 4.5.: Notwendige Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} bei verschiedenen Wahrscheinlichkeiten p für „hell“-Bewertungen der Vorfeldausleuchtung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v

v in km h^{-1}	Notwendige Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} in cd m^{-2}	
	$p = 50\%$	$p = 90\%$
0	0,88	1,65
30	1,21	2,26
50	1,43	2,67
60	1,54	2,88
100	1,98	3,70
130	2,31	4,31

Tabelle 4.5 veranschaulicht, dass die notwendigen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} im Komfortbereich der Vorfeldausleuchtung stark von der Fahrgeschwindigkeit v und der Wahrscheinlichkeit p für „hell“-Bewertungen abhängt. Während im statischen Fall bereits eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,88 \text{ cd m}^{-2}$ ausreicht, um in 50 % der Fälle eine für den Fahrzeugführer „helle“ Vorfeldausleuchtung zu erzeugen, ist bei einer Fahrgeschwindigkeit v von 130 km h^{-1} bereits eine Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $2,31 \text{ cd m}^{-2}$ erforderlich. Wird zusätzlich eine erhöhte Wahrscheinlichkeit p von 90 % betrachtet, erhöht sich die erforderliche

Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} für den statischen Fall auf $1,65 \text{ cd m}^{-2}$ und für eine Fahrgeschwindigkeit v von 130 km h^{-1} sogar auf $4,31 \text{ cd m}^{-2}$ um eine komfortable Vorfeldausleuchtung zu erreichen.

4.2. Innerhalb geschlossener Ortschaften

Im Gegensatz zu nächtlichen Verkehrssituationen außerhalb geschlossener Ortschaften, in denen die Kfz-Scheinwerfer die Beleuchtungssituation bestimmen, sind innerhalb geschlossener Ortschaften ortsfeste Straßenbeleuchtungssysteme vorhanden, welche zusammen mit den Kfz-Scheinwerfern die Beleuchtungssituation gestalten und somit ebenfalls einen Einfluss auf die Helligkeitswahrnehmung von Fahrzeugführern ausüben. Daher wird in der nachfolgend beschriebenen Untersuchung die Helligkeitswahrnehmung von Fahrzeugführern in Abhängigkeit der Abblendlichtintensität und der Straßenbeleuchtung erforscht.

Diese Untersuchung wird zusammen mit Dr.-Ing. Max Wagner durchgeführt, welcher die erhaltenen Rohdaten für die Auswertung im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Verfügung stellt.

4.2.1. Studienkonzept

Die Studie zur Helligkeitswahrnehmung wird als statische Untersuchung auf drei Teststraßen in Darmstadt durchgeführt, welche unterschiedliche Leuchtdichteniveaus $L_{\text{avg},0}$ auf der Fahrbahn erzeugen. Als Testfahrzeug dient erneut der BMW 318d xDrive Touring mit dimmbaren LED-Scheinwerfern, welcher zu Beginn dieses Kapitels ausführlicher beschrieben ist. Die Teststraßen, welche Fahrbahnleuchtdichten im Bereich der Beleuchtungsklassen M5 und M6 nach EN 13201 erzeugen, sind in Abbildung 4.10 dargestellt.



Abbildung 4.10.: Teststraßen für die Studie zur Helligkeitswahrnehmung innerhalb geschlossener Ortschaften; die Teststraßen weisen verschiedene Fahrbahnleuchtdichteniveaus auf, Teststraße 1 (links, Verkehrsstraße), Teststraße 2 (mitte, Anliegerstraße), Teststraße 3 (rechts, Hauptverkehrsstraße).

Die Fragestellung, welche die insgesamt 20 Versuchspersonen im Altersbereich von 19 bis 32 Jahren gestellt bekommen, zielt auf die Bestimmung der minimal notwendigen Fahrbahnleuchtdichte für ein ausreichendes Sicherheitsgefühl der Versuchspersonen ab. Auf allen drei Teststraßen werden den Versuchspersonen durch die Ansteuerung der LED-Scheinwerfer des Testfahrzeugs 16 unterschiedliche Fahrbahnleuchtdichten in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Die Versuchspersonen signalisieren über eine „Ja/Nein“-Antwort, ob die eingestellte Fahrbahnleuchtdichte zu einem ausreichenden subjektiven Sicherheitsgefühl führt. Die

durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichten auf den drei Teststraßen bei den verschiedenen PWM-Stufen des Abblendlichts werden durch Aufnahmen mit einer Leuchtdichtemesskamera aufgezeichnet.

4.2.2. Ergebnisse

Die Auswertung der Studie beginnt mit der Analyse der aufgezeichneten Leuchtdichtebilder, um die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} , welche aus der Interaktion der Straßenbeleuchtungssysteme und der Kfz-Scheinwerfer bei den 16 PWM-Stufen resultiert, zu bestimmen. Hierzu wird der relevante Bereich bis 32 m aus Abschnitt 4.1 betrachtet. Die erhaltenen Daten zeigen, wie in Abbildung 4.11 zu sehen, dass die Fahrbahnleuchtdichte mit Erhöhung der PWM-Stufe linear ansteigt.

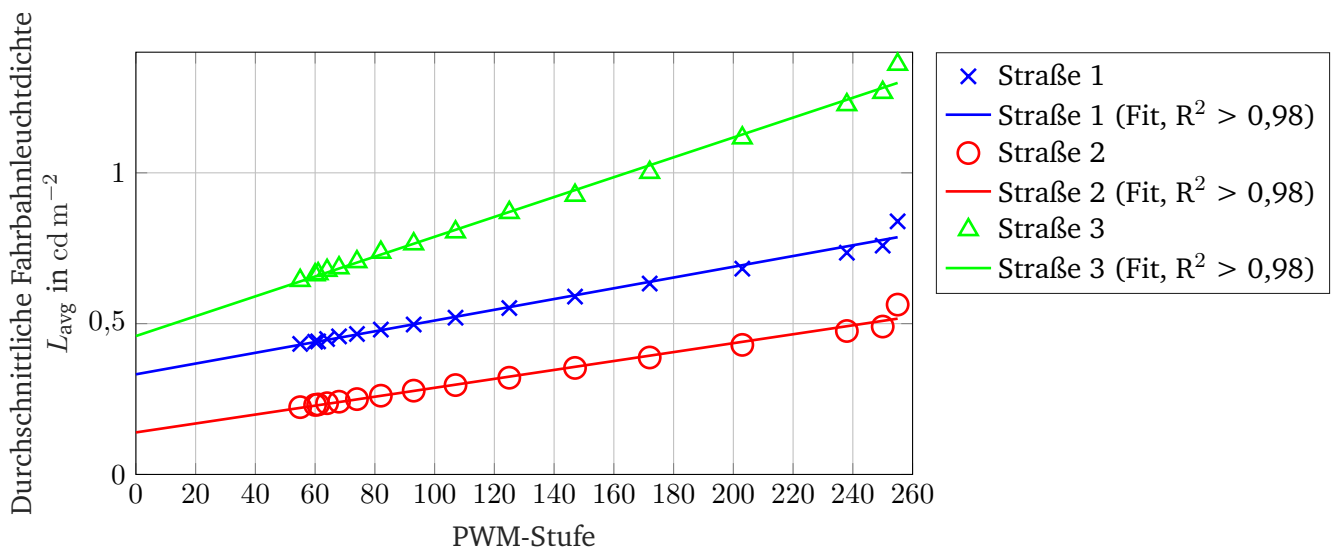


Abbildung 4.11.: Durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} auf den drei beleuchteten Teststraßen in Abhängigkeit der PWM-Stufe des Abblendlichts; Auf allen drei Teststraßen ist ein linearer Zusammenhang zwischen der eingestellten PWM-Stufe und der resultierenden Fahrbahnleuchtdichte festzustellen ($R^2 > 0,98$), die Offsetwerte bei der PWM-Stufe „0“ gibt das durch die Straßenbeleuchtung erzeugte Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$ der Fahrbahn an.

Aus Abbildung 4.11 ist ersichtlich, dass die Beziehung zwischen eingestellter PWM-Stufe des Abblendlichts und der resultierenden Fahrbahnleuchtdichte linear ist. Dies zeigt auch das Bestimmtheitsmaß R^2 , welches für alle drei Teststraßen größer als 0,98 ist. Aus diesen Daten wird aufgrund der Additivität des Lichts das Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$ jeder Teststraße als Offsetwert bei der PWM-Stufe „0“ bestimmt. Demnach ergibt sich für Teststraße 1 ein Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$ von $0,332\ cd\ m^{-2}$. Auf Teststraße 2 erzeugt die installierte Straßenbeleuchtung ein Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$ von $0,139\ cd\ m^{-2}$. Für Teststraße 3 beträgt das Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$ $0,459\ cd\ m^{-2}$.

Die Ergebnisse der Probandenbefragung zum subjektiven Sicherheitsgefühl bei den verschiedenen Fahrbahnleuchtdichten werden mit der vereinfachten psychometrischen Funktion nach LINSCHOTEN et al. [114] (siehe Gleichung 4.3) ausgewertet, da die „Ja/Nein“-Antworten den Werten einer Nominalskala entsprechen. Somit werden auf den drei Teststraßen die Anteile der „Ja“-Antworten bei den verschiedenen Fahrbahnleuchtdichten analysiert, um die Wahrscheinlichkeit für die subjektiv wahrgenommene Sicherheit beim Führen eines Kraftfahrzeugs in Abhängigkeit der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte zu bestimmen.

Die Ergebnisse der Analyse der subjektiv wahrgenommenen Sicherheit beim Führen eines Kraftfahrzeugs für die Teststraße 1 sind in Abbildung 4.12 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die psychometrische Funktion nach Gleichung 4.3 in der Lage ist den Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} und dem Anteil der Versuchspersonen, welche sich bei gegebener Lichtbedingung ausreichend sicher fühlen, zu beschreiben ($R^2 = 0,80$). So steigt der Anteil der sich ausreichend sicher fühlenden Versuchspersonen mit steigender durchschnittlicher Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} ebenfalls an.

Um die minimale Fahrbahnleuchtdichte zu bestimmen, welche für ein ausreichendes subjektives Sicherheitsgefühl erforderlich ist, wird die in Abbildung 4.12 als gestrichelte Linie dargestellte 90 %-Schwelle verwendet. An dieser Schwelle geben 90 % der Versuchspersonen an, dass sie sich bei der vorhandenen durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} ausreichend sicher fühlen, um ein Kraftfahrzeug zu führen. Diese Schwelle wird bei Teststraße 1 bei einer durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte von $0,571 \text{ cd m}^{-2}$ erreicht.

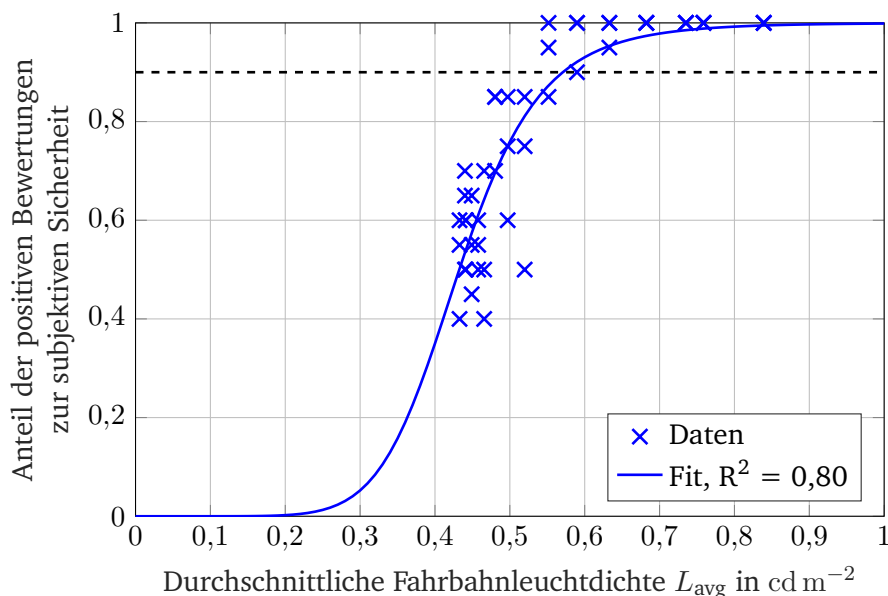


Abbildung 4.12.: Logistische Regression der Probandenbewertungen zur subjektiv wahrgenommenen Sicherheit beim Führen eines Kraftfahrzeuges auf der beleuchteten Teststraße 1; mit steigender Fahrbahnleuchtdichte steigt der Anteil der Versuchspersonen, welche sich ausreichend sicher zum Führen eines Kraftfahrzeugs fühlen; bei einer Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,571 \text{ cd m}^{-2}$ fühlen sich 90 % der befragten Personen ausreichend sicher.

Analog wird die minimal notwendige Fahrbahnleuchtdichte auf Teststraße 2 bestimmt. Der qualitative Verlauf der Helligkeitsbewertung für die Teststraße 2 in Abbildung 4.13 deckt sich mit dem qualitativen Verlauf der Sicherheitsbewertungen für Teststraße 1 in Abbildung 4.12 und kann mittels der psychometrischen Funktion nach Gleichung 4.3 abgebildet werden ($R^2 = 0,86$). So steigt, wie in Abbildung 4.13 dargestellt, das subjektiv wahrgenommene Sicherheitsgefühl der Versuchspersonen mit steigender Fahrbahnleuchtdichte. Im Vergleich zur Teststraße 1 wird in Teststraße 2, welche ein geringeres Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$ von $0,139 \text{ cd m}^{-2}$ aufweist, die 90 %-Sicherheitsschwelle bereits bei einer Fahrbahnleuchtdichte von $0,348 \text{ cd m}^{-2}$ erreicht.

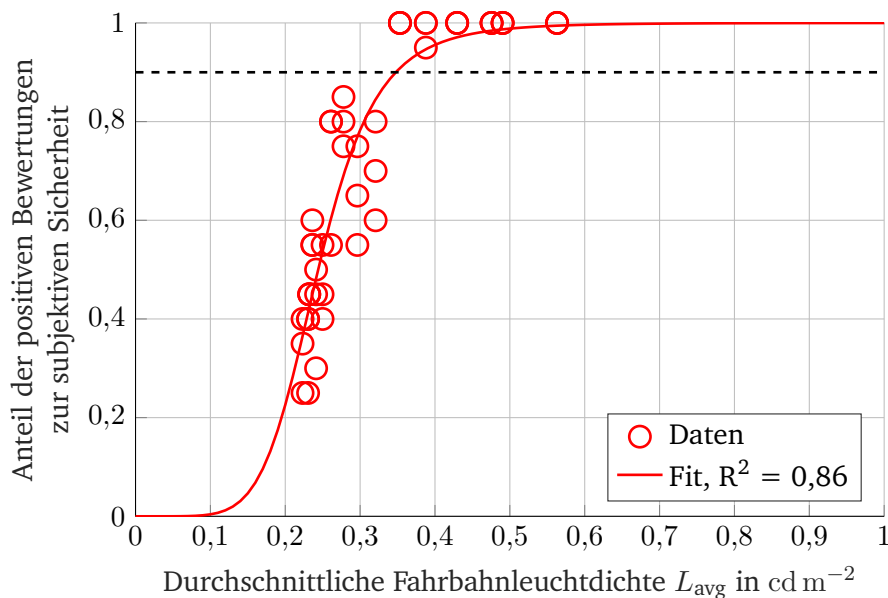


Abbildung 4.13.: Logistische Regression der Probandenbewertungen zur subjektiv wahrgenommenen Sicherheit beim Führen eines Kraftfahrzeuges auf der beleuchteten Teststraße 2; mit steigender Fahrbahnleuchtdichte steigt der Anteil der Versuchspersonen, welche sich ausreichend sicher zum Führen eines Kraftfahrzeugs fühlen; bei einer Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,348\ cd\ m^{-2}$ fühlen sich 90 % der befragten Personen ausreichend sicher.

Aus den Erkenntnissen der Datenauswertung für die beiden Teststraßen 1 und 2 ist festzuhalten, dass ein Einfluss des Leuchtdichteniveaus auf die Helligkeitswahrnehmung und das subjektive Sicherheitsgefühl der Versuchspersonen zu erwarten ist. Um diese These zu überprüfen, werden die Ergebnisse der Probandenbefragung auf Teststraße 3 analysiert. Die Datenauswertung für Teststraße 3, welche mit $0,459\ cd\ m^{-2}$ das höchste Leuchtdichteniveau der 3 Teststraßen aufweist, zeigt ebenfalls, dass der Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} und der subjektiven Sicherheitswahrnehmung korreliert und durch die psychometrische Funktion nach Gleichung 4.3 beschreibbar ist. Die Ergebnisse der Datenauswertung, welche in Abbildung 4.14 dargestellt sind, ist zu erkennen, dass beim höheren Leuchtdichteniveau auf der Teststraße 3 die notwendige Fahrbahnleuchtdichte für ein sicheres Fahrgefühl bei 90 % der Versuchspersonen ebenfalls im Vergleich zu den anderen beiden Teststraßen höher ausfällt. So wird auf Teststraße 3 eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,874\ cd\ m^{-2}$ benötigt, um die 90%-Sicherheitsschwelle zu erreichen. Somit liegen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten Fahrbahnleuchtdichten in einem ähnlichen Leuchtdichtebereich, wie die durch SIMONS [148], DE BOER [58] und KLEINKES [103] empfohlenen Fahrbahnleuchtdichten von etwa $0,4\ cd\ m^{-2}$ bis $1,0\ cd\ m^{-2}$. Des Weiteren unterstützt das Ergebnis für Teststraße 3 die These, dass das durch die Straßenbeleuchtung erzeugte Leuchtdichteniveau einen Einfluss auf die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} hat, welche für ein ausreichendes Sicherheitsgefühl beim Führen eines Kraftfahrzeugs erforderlich ist.

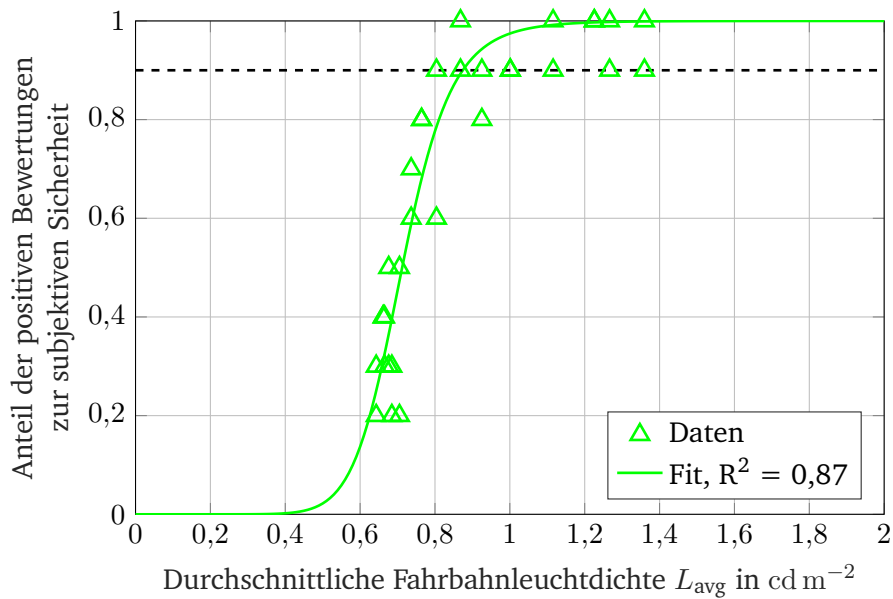


Abbildung 4.14.: Logistische Regression der Probandenbewertungen zur subjektiv wahrgenommenen Sicherheit beim Führen eines Kraftfahrzeuges auf der beleuchteten Teststraße 3; mit steigender Fahrbahnleuchtdichte steigt der Anteil der Versuchspersonen, welche sich ausreichend sicher zum Führen eines Kraftfahrzeugs fühlen; bei einer Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,874\ cd\ m^{-2}$ fühlen sich 90 % der befragten Personen ausreichend sicher.

Um den Einfluss des Leuchtdichteniveaus $L_{avg,0}$ auf die erforderliche Mindestfahrbahnleuchtdichte L_{avg} näher zu betrachten, werden die ermittelten Ergebnisse auf Korrelation geprüft (siehe Abbildung 4.15).

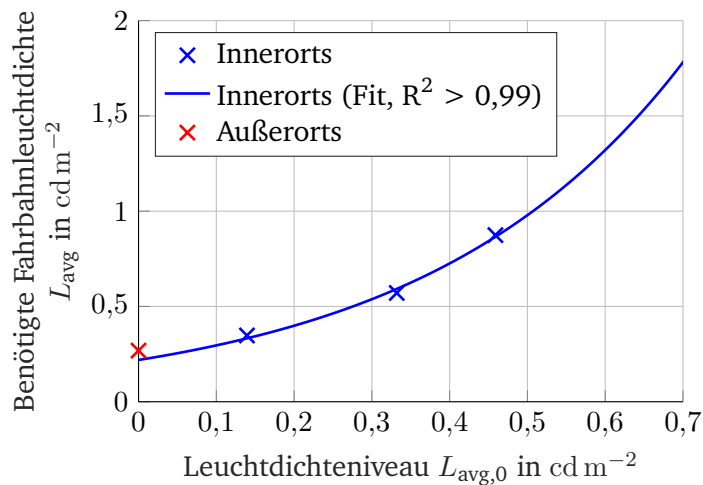


Abbildung 4.15.: Zusammenhang zwischen der benötigten Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} und dem Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$; es besteht ein durch eine Exponentialfunktion beschreibbarer Zusammenhang, dem das Ergebnis außerhalb geschlossener Ortschaften ebenfalls folgt.

Wie Abbildung 4.15 zeigt, besteht eine Korrelation zwischen dem Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$ und der benötigten Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} ($R^2 > 0,99$), welche durch eine Exponentialfunktion nach Gleichung 4.4

beschrieben wird. Des Weiteren ist festzustellen, dass die benötigte Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} außerhalb geschlossener Ortschaften von $0,269 \text{ cd m}^{-2}$ ebenfalls diesem exponentiellen Verlauf folgt.

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x) \quad (4.4)$$

Wird das Leuchtdichteniveau einer Straße erhöht, so steigt die auf dieser Straße benötigte Fahrbahnleuchtdichte für ein ausreichendes Sicherheitsgefühl beim Führen eines Kraftfahrzeuges exponentiell an. Eine potenzielle Ursache für dieses Verhalten ist, dass die Versuchspersonen sich erst dann ausreichend sicher fühlen, wenn sie sehen, dass die Scheinwerfer des eigenen Fahrzeugs eingeschaltet sind und sie somit als aktive Verkehrsteilnehmer registriert werden.

Der exponentielle Anstieg der benötigten Fahrbahnleuchtdichte lässt sich wiederum durch das Weber-Fechner Gesetz [70] erklären. So sorgt die relative und logarithmische Helligkeitswahrnehmung des Menschen dafür, dass bei der Adaptation auf höhere Leuchtdichteniveaus die benötigte Leuchtdichtedifferenz, welche durch die Erhöhung der Fahrbahnleuchtdichte über die Steigerung der Abblendlichtintensität der Kfz-Scheinwerfer erreicht wird, ebenfalls stärker ansteigt. Dies führt dazu, dass bei höheren Leuchtdichteniveaus höhere Fahrbahnleuchtdichten für das subjektive Sicherheitsgefühl präferiert werden.

4.3. Fazit zur Helligkeitswahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr

Dieser Abschnitt fasst die Untersuchungen zur Helligkeitswahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr zusammen. Hierzu werden die in Unterabschnitt 3.4.2 abgeleiteten Forschungsfragen aufgegriffen und beantwortet.

Welcher Bereich im Fahrzeugvorfeld ist für die Helligkeitsbewertung von Fahrzeugführern relevant?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird das Fahrzeugvorfeld in drei Bereiche (bis 20 m, zwischen 20 m und 32 m, ab 32 m vor dem Fahrzeug) eingeteilt und von den Versuchspersonen bezüglich ihrer Relevanz für die Helligkeitsbewertung auf einer Schulnotenskala von „1“ bis „5“ bewertet. Die Analyse der Bewertungen zeigt, dass das Fernfeld ab einer Entfernung von 32 m vor dem Fahrzeug signifikant als weniger wichtig bewertet wird als die anderen beiden Vorfeldbereiche. Da zwischen dem Vorfeld (bis 20 m vor dem Fahrzeug) und dem Mittelfeldbereich (zwischen 20 m und 32 m vor dem Fahrzeug) kein signifikanter Unterschied in den Probandenbewertungen vorhanden ist, werden diese beiden Bereiche als die für die Helligkeitsbewertung relevanten Bereiche definiert. Somit ergibt sich der Vorfeldbereich bis zu einer Entfernung von 32 m vor dem Fahrzeug als relevanter Bereich für die Helligkeitsbewertung von Fahrzeugführern.

Hat die Fahrgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Helligkeitswahrnehmung von Fahrzeugführern?

Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Helligkeitswahrnehmung wird durch die Durchführung von Helligkeitsbewertungen außerhalb geschlossener Ortschaften bei Fahrgeschwindigkeiten von 0 km h^{-1} , 30 km h^{-1} und 60 km h^{-1} nachgewiesen. Die Ergebnisse der durchgeführten Studie zeigen, dass die gleiche durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte bei höheren Fahrgeschwindigkeiten von den Versuchspersonen dunkler wahrgenommen wird. Die Auswertung der „hell“-Antworten mit der psychometrischen Funktion zeigt zudem, dass bei höheren Fahrgeschwindigkeiten höhere Fahrbahnleuchtdichten notwendig sind, um den Anteil der Versuchspersonen, die die Vorfeldausleuchtung als „hell“ bewerten, konstant zu halten.

Welche Mindestfahrbahnleuchtdichte ist im non-urbanen Verkehrsraum notwendig, um ein adäquates Sicherheitsgefühl bei Fahrzeugführern hervorzurufen?

Für die Definition der Mindestfahrbahnleuchtdichte im non-urbanen Verkehrsraum sind zwei Schwellen zu betrachten. Um Fahrzeugführern ein ausreichendes Sicherheitsgefühl für das Führen eines Kraftfahrzeuges zu geben, ist im statischen Fall eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,269 \text{ cd m}^{-2}$ im Vorfeldbereich bis 32 m notwendig. Wird die Fahrgeschwindigkeit auf 30 km h^{-1} oder 60 km h^{-1} erhöht, so erhöht sich die notwendige Fahrbahnleuchtdichte auf $0,413 \text{ cd m}^{-2}$.

Die zweite Schwelle, welche den Übergang in den Komfortbereich der Vorfeldausleuchtung beschreibt, wird im statischen Fall bei einer durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $1,0 \text{ cd m}^{-2}$ erreicht und bestätigt damit die Empfehlung von KLEINKES [103]. Eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit hat hier ebenfalls eine Erhöhung der Fahrbahnleuchtdichte zur Folge. So ist die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} im Vorfeldbereich bis 32 m auf $1,4 \text{ cd m}^{-2}$ für eine Fahrgeschwindigkeit von 30 km h^{-1} und auf $2,0 \text{ cd m}^{-2}$ für eine Fahrgeschwindigkeit von 60 km h^{-1} zu erhöhen.

Welche Mindestfahrbahnleuchtdichte ist im urbanen Verkehrsraum notwendig, um ein adäquates Sicherheitsgefühl bei Fahrzeugführern hervorzurufen?

Die Mindestfahrbahnleuchtdichte im urbanen Verkehrsraum wird auf drei verschiedenen beleuchteten Straßen in Darmstadt untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die benötigte Fahrbahnleuchtdichte von der betrachteten Straße und der installierten Straßenbeleuchtung abhängig ist. Erzeugt die Straßenbeleuchtung allein eine Fahrbahnleuchtdichte von $0,332 \text{ cd m}^{-2}$, so ist für ein ausreichendes Sicherheitsgefühl bei 90 % der Fahrzeugführer eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte von $0,571 \text{ cd m}^{-2}$ erforderlich. Wird auf der Straße durch die Straßenbeleuchtung eine Fahrbahnleuchtdichte $L_{avg,0}$ von $0,139 \text{ cd m}^{-2}$ erzeugt, so ist bereits eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte von $0,348 \text{ cd m}^{-2}$ für ein adäquates Sicherheitsgefühl bei 90 % der Versuchspersonen ausreichend. Bei einer heller beleuchteten Straße ($L_{avg,0} = 0,459 \text{ cd m}^{-2}$) wird hingegen eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,874 \text{ cd m}^{-2}$ für den gleichen Effekt benötigt. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten Fahrbahnleuchtdichten bestätigen den von SIMONS [148], DE BOER [58] und KLEINKES [103] empfohlenen Leuchtdichtebereich mit Fahrbahnleuchtdichten von etwa $0,4 \text{ cd m}^{-2}$ bis $1,0 \text{ cd m}^{-2}$.

Welchen Einfluss hat das durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung erzeugte Leuchtdichteniveau auf die notwendige Fahrbahnleuchtdichte?

Die Ergebnisse der sowohl innerhalb als auch außerhalb geschlossener Ortschaften durchgeführten Studien zeigen, dass das vorhandene Leuchtdichteniveau einen deutlichen Einfluss auf die für ein sicheres Gefühl von Fahrzeugführern benötigte Fahrbahnleuchtdichte hat. So steigt mit höherem Leuchtdichteniveau auf der Fahrbahn die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte, welche für ein ausreichendes Sicherheitsgefühl benötigt wird, exponentiell an. Dieser exponentielle Anstieg ist durch das Weber-Fechner Gesetz [70] zu erklären, aus dem hervorgeht, dass bei höheren Adaptationsleuchtdichten höhere Leuchtdichtedifferenzen ΔL erforderlich sind, um die gleiche subjektive Wahrnehmung hervorzurufen.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} ab etwa $1,0 \text{ cd m}^{-2}$ geeignet ist, um sowohl innerhalb als auch außerhalb geschlossener Ortschaften ein adäquates Sicherheitsgefühl bei Fahrzeugführern hervorzurufen und gleichzeitig eine komfortable Vorfeldausleuchtung zur Verfügung zu stellen. Im urbanen Verkehrsraum ist sogar eine Reduktion der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte in Abhängigkeit der vorhandenen Straßenbeleuchtung realisierbar. Hierfür ist das durch die Straßenbeleuchtung erzeugte Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$ auf der Fahrbahn mithilfe einer Kamera, welche

für die Messung von orts aufgelösten Leuchtdichten kalibriert ist, oder einem entsprechenden Photometer zu bestimmen.

5. Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr

Im Vergleich zur Helligkeitswahrnehmung, die von subjektiven Empfindungen dominiert wird, ist die Objektdetektion ein Prozess, der durch objektive physiologische Wahrnehmungsprozesse bestimmt wird. Die Objektdetektion spielt eine entscheidende Rolle für die Sicherheit im Straßenverkehr und dient daher als Kriterium für die Auslegung des segmentierten Fahrlichts, welches wie in Abbildung 3.23 dargestellt, deutlich in den Bereich des Abblendlichts verschoben wird.

Die nachfolgend beschriebenen Studien verfolgen das Ziel die minimale Lichtstärke zu definieren, welche für die sichere Detektion von Objekten im Verkehrsraum erforderlich ist. Als sichere Detektion werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Detektionswahrscheinlichkeiten ab 90 % definiert. Hierzu werden anders als in bisherigen Studien sowohl der Abstand als auch der Winkel zwischen Beobachter und Detektionsobjekt variiert, um eine Definition von Lichtstärkeverteilungen zu ermöglichen. Dabei werden die Studien sowohl außerhalb als auch innerhalb geschlossener Ortschaften durchgeführt, um den Einfluss der ortsfesten Straßenbeleuchtung zu untersuchen. Zusätzlich bilden die durchgeführten Untersuchungen „Worst-Case“-Szenarien ab, indem in Anlehnung an vorangehende Studien 20 cm · 20 cm große Graukarten mit einem Reflexionsgrad von etwa 4 % verwendet werden [3, 93]. Es wird ein geringer Reflexionsgrad gewählt, da nach Studien von RANDRUP HANSEN und SCHANDEL LARSEN [130] oder SCHNEIDER [142] vor allem die Winterkleidung von Fußgängern geringe Reflexionsgrade von weniger als 10 % aufweisen. Alle Studien werden im statischen Fall durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Studienbedingungen für die Versuchspersonen zu gewährleisten.

5.1. Außerhalb geschlossener Ortschaften

Das Ziel der Detektionsuntersuchungen außerhalb geschlossener Ortschaften ist die Bestimmung minimal notwendiger Lichtstärken für die sichere Objektdetektion ($p \geq 90\%$) in Abhängigkeit der Objektposition. Hierzu wird neben der Abstandsabhängigkeit auch die Winkelabhängigkeit der Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr untersucht. Des Weiteren wird der allgemeine Einfluss von Umgebungsbedingungen auf das für die Detektion benötigte Visibility Level VL betrachtet.

5.1.1. Studienkonzept

Die Studie für die Objektdetektion außerhalb geschlossener Ortschaften wird in zwei Teile aufgeteilt. So findet einerseits die Studie unter stark kontrollierten Bedingungen in einem Lichtkanal statt und andererseits wird die Studie auf einem abgesperrten Testgelände durchgeführt. Diese Trennung wird durchgeführt, um unter kontrollierten Bedingungen den Einfluss des Abstands und des Winkels auf die Objektdetektion zu bestimmen. Die Durchführung der Studie auf dem abgesperrten Testgelände erfüllt den Zweck einer realistischeren Nachbildung der Verkehrssituation auf Landstraßen.

Insgesamt nehmen, bedingt durch die COVID-19-Pandemie, elf Versuchspersonen (Altersbereich: 18 bis 59 Jahre) an der Studie im Lichtkanal und 15 Versuchspersonen (Altersbereich: 18 bis 34 Jahre) an der Studie auf dem abgesperrten Gelände teil. Dabei sind alle Versuchspersonen zum Zeitpunkt der Untersuchung im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis und tragen bei Bedarf ihre Sehhilfe. Somit wird eine für das Führen

eines Kraftfahrzeugs mindestens erforderliche Sehschärfe mit einem Visus von 0,7 vorausgesetzt und keine zusätzliche Sehschärfeüberprüfung durchgeführt.

Für die Variation des Abstands und des Winkels zwischen Detektionsobjekt und Beobachter wird die Graukarte auf festen Positionen von Messrastern aufgestellt. Die Messraster werden dabei an die verfügbaren Gesamtabmessungen des jeweiligen Versuchsgeländes angepasst. So steht im Lichtkanal eine nutzbare Fläche von $120\text{ m} \cdot 12\text{ m}$ zur Verfügung, während auf dem abgesperrten Testgelände eine Breite von etwa 20 m auf einer Fahrbahn mit über 1 km Länge verfügbar ist. Anhand dieser Begrenzungen werden die Messraster, welche in Abbildung 5.1 zu sehen sind, für die Teilstudien ausgelegt.

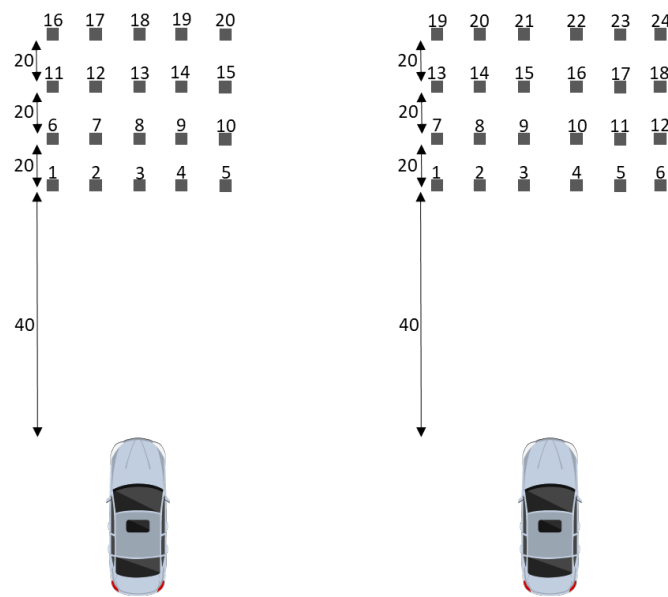


Abbildung 5.1.: Schematische Darstellung der Messraster für die Detektionsstudien außerhalb geschlossener Ortschaften; im Lichtkanal wird ein 4×5 Messraster realisiert (links), während auf dem abgesperrten Testgelände ein 4×6 Messraster realisierbar ist (rechts), die Entfernung zu den einzelnen Objektreihen beträgt 40 m , 60 m , 80 m und 100 m , die Zahlen über den Rasterpunkten geben die interne Bezeichnung der jeweiligen Objektposition an.

Die Abstände zu den Objektreihen der Messraster betragen bei beiden Studien 40 m , 60 m , 80 m und 100 m . Durch die Begrenzung des Lichtkanals ist, wie in Abbildung 5.1 links dargestellt, ein 4×5 Messraster realisierbar, mit welchem insgesamt 20 Objektpositionen bei der Detektionsstudie untersucht werden. Auf dem abgesperrten Testgelände werden insgesamt 24 Objektpositionen in einem 4×6 Messraster betrachtet (siehe Abbildung 5.1 rechts). Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 zeigen die genauen Positionen der Graukarten vor dem Testfahrzeug in den jeweiligen Messrastern. Dabei stellen negative horizontale Entfernungen einen Versatz nach links bezüglich der Fahrzeuglängsachse und positive horizontale Entfernungen einen Versatz nach rechts in Bezug zur Fahrzeuglängsachse dar.

So zeigt Tabelle 5.1, dass im Lichtkanal eine Breite von $\pm 4,50\text{ m}$ durch das Messraster aufgespannt wird, wobei der horizontale Abstand zwischen zwei Rasterpunkten $2,25\text{ m}$ beträgt. Des Weiteren befindet sich in jeder Objektreihe ein Objekt auf der Fahrzeuglängsachse (Versatz: $0,00\text{ m}$). Somit wird hier bei konstantem Winkel lediglich der Abstand zwischen 40 m und 100 m variiert.

Tabelle 5.1.: Zuordnung der Objektpositionen zu Messrasterpunkten im Lichtkanal

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abstand zum Fahrzeug in m			
	40	60	80	100
-4,50	Position 1	Position 6	Position 11	Position 16
-2,25	Position 2	Position 7	Position 12	Position 17
0,00	Position 3	Position 8	Position 13	Position 18
2,25	Position 4	Position 9	Position 14	Position 19
4,50	Position 5	Position 10	Position 15	Position 20

Im Gegensatz zum Lichtkanal beträgt die Gesamtbreite auf dem abgesperrten Testgelände insgesamt 18 m ($\pm 9,00$ m) mit horizontalen Abständen zwischen den Rasterpunkten von 3,00 m. Bei diesem Messraster wird auf der Fahrzeuglängsachse kein Objekt positioniert, da hier die Graukarten teilweise direkt auf Fahrbahnmarkierungen stehen würden und somit die Detektionsbedingungen an diesen Positionen beeinflussen.

Tabelle 5.2.: Zuordnung der Objektpositionen zu Messrasterpunkten auf dem abgesperrten Testgelände

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abstand zum Fahrzeug in m			
	40	60	80	100
-9,00	Position 1	Position 7	Position 13	Position 19
-6,00	Position 2	Position 8	Position 14	Position 20
-3,00	Position 3	Position 9	Position 15	Position 21
3,00	Position 4	Position 10	Position 16	Position 22
6,00	Position 5	Position 11	Position 17	Position 23
9,00	Position 6	Position 12	Position 18	Position 24

Als Testfahrzeug wird erneut der BMW 318d xDrive verwendet, um über die PWM-Dimmfunktion die absolute Lichtstärke der Scheinwerferlichtverteilung zu ändern. Im Falle der Detektionsuntersuchungen außerhalb geschlossener Ortschaften wird neben dem Abblendlicht auch das Fernlicht dimmbar gestaltet, um größere Detektionsabstände abzudecken. Somit wird über die PWM-Dimmung die Objektleuchtdichte L_O und die Umfeldleuchtdichte L_U variiert. Um die Leuchtdichten auszuwerten, werden mit einer Leuchtdichtemesskamera Leuchtdichtebilder bei den verschiedenen PWM-Stufen aufgezeichnet.

Die Studiendurchführung beginnt mit einer Adaptationsphase von etwa 15 min, bei der die Versuchspersonen die Instruktionen für die Versuchsdurchführung erhalten. Anschließend wird die Graukarte auf der ersten randomisiert gewählten Position platziert. Die Lichtstärke des Scheinwerfers wird in diskreten PWM-Stufen von 0 % bis 100 % erhöht und die Versuchsperson hat die Aufgabe die Detektion der Graukarte zu signalisieren, während sie ein zweites Fahrzeug, welches hinter der letzten Objektreihe in Fahrtrichtung positioniert ist, fixiert. Die Blickfixation ist erforderlich, damit der Winkel zwischen Beobachter und Detektionsobjekt für alle Versuchspersonen reproduzierbar ist. Nachdem alle PWM-Stufen bei der aktuellen Objektposition durchlaufen werden, wird in randomisierter Reihenfolge mit den weiteren Objektpositionen fortgefahren. Für den Wechsel der Objektpositionen wird die Versuchsperson gebeten die Augen zu schließen, damit die nächste Objektposition zunächst unbekannt bleibt. Diese Vorgehensweise wird so lange wiederholt bis die Untersuchung auf allen Objektpositionen abgeschlossen ist. Die Studiendurchführung ist für den Lichtkanal und das abgesperrte Testgelände identisch.

5.1.2. Ergebnisse

Im Folgenden wird die Datenauswertung anhand der Studie im Lichtkanal beschrieben, da diese für beide Testumgebungen identisch ist. An den entscheidenden Stellen werden die Ergebnisse für das abgesperrte Testgelände ebenfalls erörtert.

Die Datenauswertung beginnt mit der Bestimmung der Objektleuchtdichte L_O und der Umfeldleuchtdichte L_U (Mittelwert der Umfeldleuchtdichten der 4 angrenzenden Bereiche) aus den aufgezeichneten Leuchtdichtebildern, welche exemplarisch für den Lichtkanal auf der linken Seite und für das abgesperrte Testgelände auf der rechten Seite in Abbildung 5.2 dargestellt sind. Die Leuchtdichtebilder werden dabei reihenweise aufgezeichnet, sodass je PWM-Stufe ein Leuchtdichtebild für die Auswertung aller fünf bzw. sechs Objektpositionen in der jeweiligen Reihe ausreichend ist.

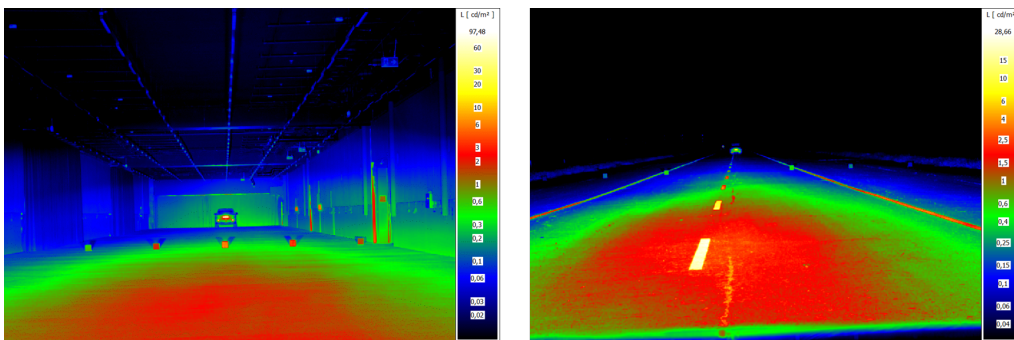


Abbildung 5.2.: Exemplarische Darstellung der aufgezeichneten Leuchtdichtebilder für den Lichtkanal (links) und das abgesperrte Testgelände (rechts); in den beiden Abbildungen ist das Fixationsfahrzeug, welches hinter der letzten Objektreihe in Fahrtrichtung positioniert ist, zu sehen.

Aus den ermittelten Daten für die Objektleuchtdichte L_O und Umfeldleuchtdichte L_U wird die Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Weberkontrast K_W durch Gleichung 3.1 berechnet. Zusätzlich wird über das STV Modell (Gleichung 3.5) die Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} und anschließend das Visibility Level VL mit Gleichung 3.6 bestimmt.

Die Ergebnisse der photometrischen Auswertung des Weberkontrasts K_W sind exemplarisch für Position 1, welche sich in 40 m Entfernung vor dem Fahrzeug und einem horizontalen Versatz von $-4,50$ m zur Fahrzeuglängsachse befindet, in Abbildung 5.3 dargestellt. Aus Abbildung 5.3 geht hervor, dass sowohl die Objektleuchtdichte L_O als auch die Umfeldleuchtdichte L_U ab einer PWM-Stufe von 45 linear ansteigt (siehe Abbildung 5.3 links). Dies führt dazu, dass die Leuchtdichtedifferenz ΔL zwischen dem Objekt und seinem Umfeld ebenfalls linear ansteigt. Aufgrund dieser Linearität geht der Kontrastverlauf, wie in Abbildung 5.3 rechts gezeigt, mit steigender PWM-Stufe in Sättigung. Dieser Zusammenhang lässt sich durch die Berechnung des Weberkontrastes K_W mit den linear ansteigenden Leuchtdichten in Gleichung 5.1 beschreiben.

$$K_W(\text{PWM}) = \frac{L_O(\text{PWM}) - L_U(\text{PWM})}{L_U(\text{PWM})} = \frac{\Delta L(\text{PWM})}{L_U(\text{PWM})} = \frac{a \cdot \text{PWM}}{b \cdot \text{PWM}} = \frac{a}{b} = \text{const.} \quad (5.1)$$

Wie Gleichung 5.1 zeigt, ist der Verlauf der Leuchtdichtedifferenz ΔL als Vielfaches a der eingestellten PWM-Stufe beschreibbar. Dies gilt ebenfalls für die Umfeldleuchtdichte L_U , welche über die konstante Steigung b mit der eingestellten PWM-Stufe verknüpft ist. Somit ergibt sich im linearen Bereich des Leuchtdichteverlaufs ein konstanter Weberkontrast K_W , welcher sich als Verhältnis der beiden Steigungen a und b darstellen lässt.

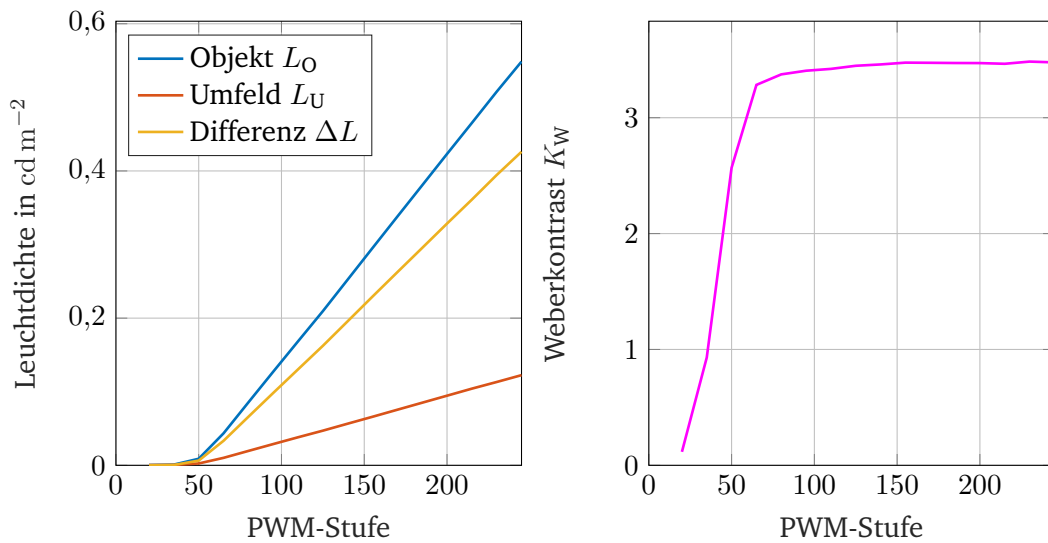


Abbildung 5.3.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 1 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

Dadurch, dass der Weberkontrast K_W einen Sättigungsbereich erreicht und somit keine Differenzierung bei höheren PWM-Stufen zulässt, wird für die weitere Auswertung das in Abbildung 5.4 rechts dargestellte Visibility Level VL betrachtet. Wie Abbildung 5.4 zeigt, steigt das Visibility Level VL mit steigender PWM-Stufe und ermöglicht so in der weiteren Auswertung eine differenzierte Betrachtung über den gesamten einstellbaren Intensitätsbereich der LED-Scheinwerfer des Testfahrzeugs.

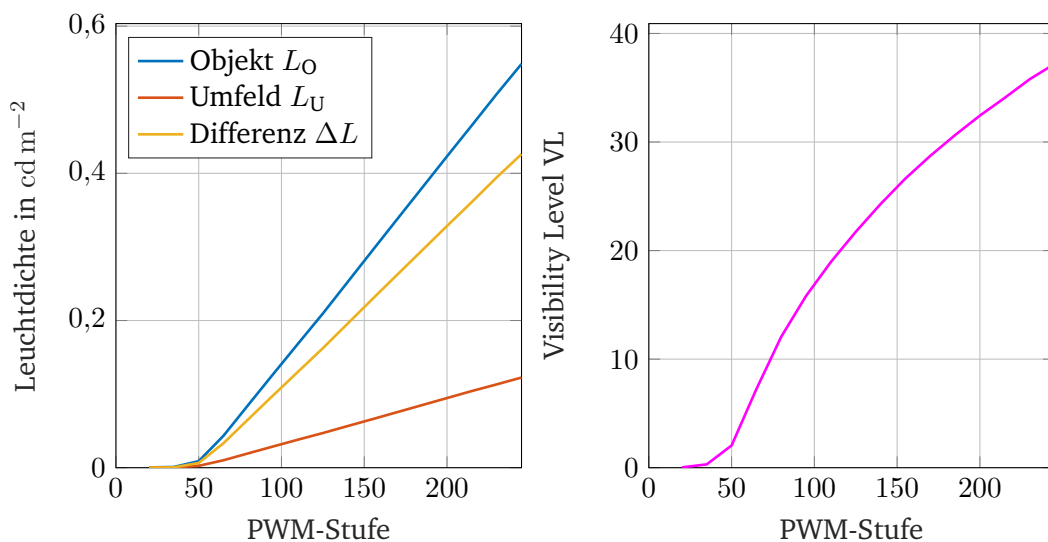


Abbildung 5.4.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 1 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

Für die Leuchtdichte-, Kontrast- und Visibility Level-Verläufe an weiteren Objektpositionen sei an dieser Stelle auf Anhang A.1 verwiesen.

Somit stellt das durch die unterschiedliche Ansteuerung der LED-Scheinwerfer erzeugte Visibility Level an den verschiedenen Objektpositionen die unabhängige Variable dar. Als abhängige Variable wird die Detektionswahrscheinlichkeit der Graukarte bei gegebenem Visibility Level betrachtet. Diese wird über die Bestimmung des Anteils an Versuchspersonen, welche die Graukarte bei der jeweiligen Konstellation detektiert haben, berechnet. Da dabei keine zufälligen positiven Antworten zu erwarten sind, wird der Zusammenhang mit der vereinfachten psychometrischen Funktion nach LINSCHOTEN et al. [114] aus Gleichung 4.3 untersucht. Von einer sicheren Objektdetektion wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ab einer Detektionswahrscheinlichkeit von 90 % gesprochen. Weitere relevante Schwellen sind die 50 %-Schwelle („kritische Schwelle“) und die 70 %-Schwelle („passable Detektion“).

Die Auswertung der Objektdetektionswahrscheinlichkeit mit der psychometrischen Funktion wird in Abbildung 5.5 exemplarisch für die Objektposition 1 im Lichtkanal gezeigt. Die auf die gleiche Wiese ausgewerteten Zusammenhänge für die weiteren Objektpositionen sind in Anhang A.2 zu finden.

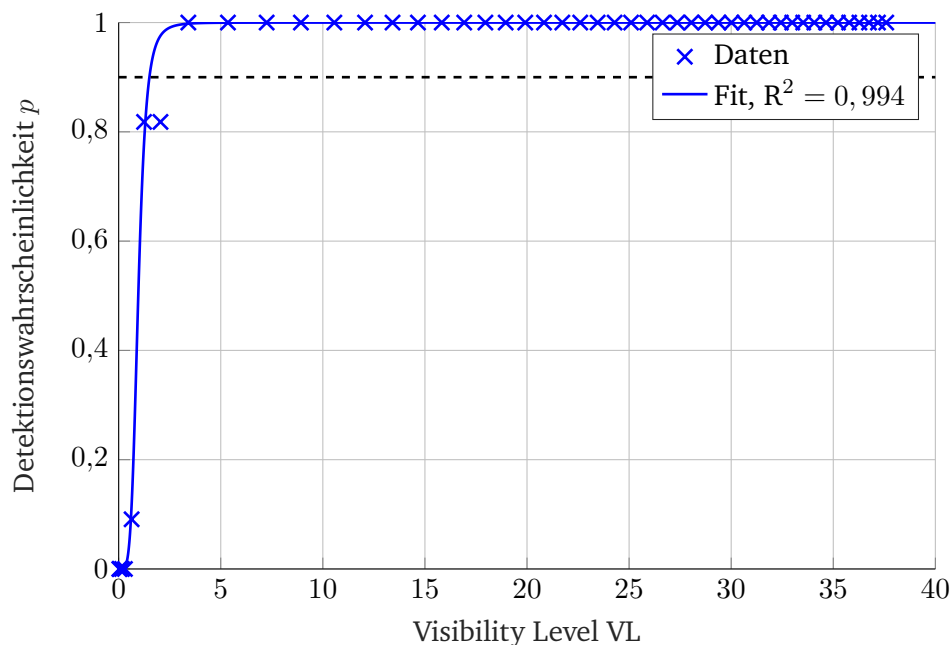


Abbildung 5.5.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 1 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 1,505 benötigt.

Abbildung 5.5 zeigt, dass der Zusammenhang zwischen dem vorhandenen Visibility Level VL und der Detektionswahrscheinlichkeit sehr gut durch die psychometrische Funktion abgebildet wird ($R^2 = 0,994$). Wird die in Abbildung 5.5 dargestellte Detektionswahrscheinlichkeit der Graukarte auf Position 1 betrachtet, so ist festzustellen, dass ab einem Visibility Level von 1,505 die Detektionswahrscheinlichkeit mindestens 90 % beträgt und somit als „sicher detektiert“ bezeichnet wird. Auf diese Weise werden alle weiteren Objektpositionen ausgewertet und eine orts aufgelöste Verteilung des benötigten Visibility Levels bestimmt, welche in Tabelle 5.3 gezeigt ist.

Tabelle 5.3.: Benötigtes Visibility Level VL auf den verschiedenen Objektpositionen im Lichtkanal

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abstand zum Fahrzeug in m			
	40	60	80	100
-4,50	1,505	2,029	2,480	3,454
-2,25	2,384	2,173	6,380	4,804
0,00	7,760	6,295	21,500	9,920
2,25	3,252	5,140	4,300	6,610
4,50	10,955	8,220	7,450	15,030

Aus Tabelle 5.3 geht hervor, dass das benötigte Visibility Level VL in einem Bereich von 1,505 bis 21,500 liegt. Der Wert von 21,500 stellt dabei einen Ausreißer dar, welcher aus der Nähe der Objektposition zum Fixationsobjekt resultiert. Bei Betrachtung der Messreihen bei den einzelnen Entfernungen ist auffällig, dass das benötigte Visibility Level beim Übergang vom fovealen Gesichtsfeld (Versatz: 0,00 m) in das periphere Gesichtsfeld sinkt. Eine Ausnahme bildet der horizontale Versatz von 4,50 m nach rechts. Hier steigt das Visibility Level wieder an. Nach Aussage der Versuchspersonen ist die potenzielle Ursache hierfür die Nähe der Objekte zur Wand des Lichtkanals (siehe Abbildung 5.2 links). So geben die Versuchspersonen an, dass diese Nähe zur Wand des Lichtkanals die Detektion der Objekte erheblich erschwert. Aus diesem Grund werden die Objektpositionen ganz rechts bei der Betrachtung der Winkelabhängigkeit zunächst nicht weiter betrachtet.

Nach der Bereinigung der Daten von diesen Anomalien, wird die Winkelabhängigkeit des Visibility Levels bei der Detektion außerhalb geschlossener Ortschaften bestimmt. Hierfür werden die Winkel zu den jeweiligen Messrasterpunkten bestimmt und die Daten für die verschiedenen Abstände zusammengefasst. Das Zusammenfassen der Daten wird dadurch ermöglicht, dass der Abstand bereits bei der Berechnung der Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} mit dem STV Modell und der dafür benötigten Objektgröße α (siehe Gleichung 5.2) berücksichtigt wird. Die resultierende Objektgröße α in min für die Graukarte in verschiedenen Abständen ist Anhang A.3 zu entnehmen.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D}{d}\right) \quad (5.2)$$

Dabei beschreibt D die Ausdehnung des Objekts in m und d den Abstand zum Testfahrzeug in m. Das Resultat dieser Auswertung ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Um die Korrelation zwischen dem Exzentrizitätswinkel Θ und dem benötigten Visibility Level VL zu beschreiben, wird aufgrund der Datenlage eine Gaußfunktion mit zwei Termen nach Gleichung 5.3 verwendet.

$$f(x) = a_1 \cdot \exp\left(-\left(\frac{x - b_1}{c_1}\right)^2\right) + a_2 \cdot \exp\left(-\left(\frac{x - b_2}{c_2}\right)^2\right) \quad (5.3)$$

Die Auswertung der Daten mit dieser Gleichung zeigt, dass eine gaußförmige Korrelation zwischen dem Exzentrizitätswinkel Θ und dem Visibility Level VL, welches für eine sichere Objektdetektion benötigt wird, vorhanden ist. Somit werden die Erkenntnisse aus früheren Studien von DAMASKY [56] und SCHNEIDER [143] durch die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Studie bestätigt.

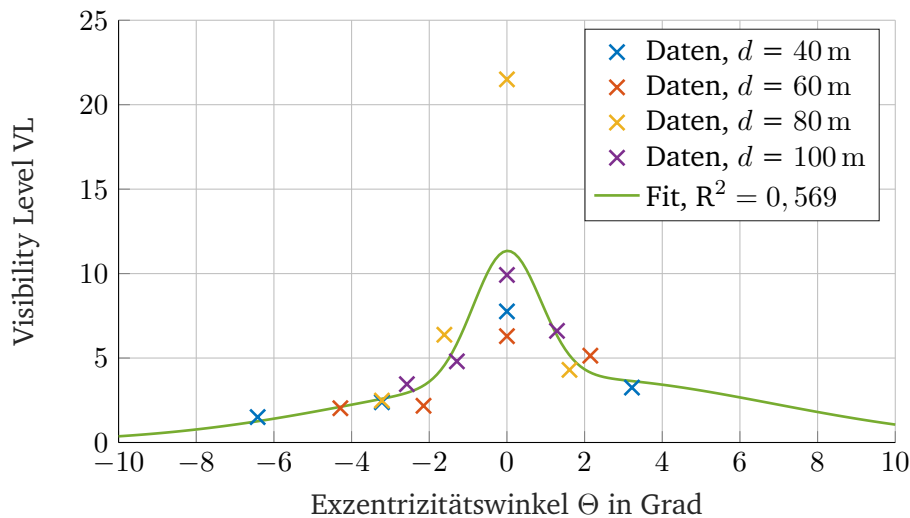


Abbildung 5.6.: Winkelabhängigkeit des Visibility Levels VL; mit größer werdendem Betrag des Exzentrizitätswinkels Θ sinkt das benötigte VL für eine sichere Objektdetektion.

Die in Abbildung 5.6 dargestellte Winkelabhängigkeit des Visibility Levels für eine sichere Detektion resultiert aus der in Abschnitt 3.1 erörterten Verteilung der Rezeptoren auf der Netzhaut. Dadurch, dass die Untersuchungen im für den nächtlichen Straßenverkehr typischen mesopischen Bereich durchgeführt werden, werden durch die Adaptationszeit von 15 min die Stäbchen aktiviert. Dadurch, dass die im Vergleich zu den foveal konzentrierten Zapfen hellempfindlicheren Stäbchen eher im peripheren Bereich der Netzhaut vorzufinden sind (siehe Abbildung 3.2), ist die Hellempfindlichkeit beim mesopischen Sehen im peripheren Bereich höher und die Kontrastwahrnehmung gegenüber dem fovealen Sehen verbessert.

Der in Abbildung 5.6 dargestellte gaußförmige Zusammenhang zwischen dem Exzentrizitätswinkel Θ und dem benötigten Visibility Level VL zeigt, dass für die Auslegung von optimierten Lichtstärkeverteilungen der foveale Bereich den kritischen Bereich („Worst-Case“) darstellt. So ist die Lichtstärke anhand des benötigten Visibility Levels für den fovealen Bereich zu ermitteln und anschließend für die Segmente im peripheren Bereich (vgl. Abbildung 3.23) zu übernehmen.

Um das benötigte Visibility Level über die verschiedenen Objektpositionen zu bestimmen und somit eine gemeinsame Grundlage für die Auslegung der Frontscheinwerfer-Lichtverteilungen zu schaffen, wird der Zusammenhang zwischen dem Anteil der detektierten Objektpositionen und dem Visibility Level betrachtet. Für diese Betrachtung werden die Objektpositionen bei einem Versatz von 4,50 m wieder einbezogen und somit alle 20 Objektpositionen im Lichtkanal analysiert.

Die Auswertung der detektierten Objektpositionen erfolgt über die berechneten Visibility Level in Tabelle 5.3. So wird der Anteil der detektierten Objektpositionen bestimmt, indem bei dem jeweiligen Visibility Level die Anzahl der Objektpositionen summiert wird, bei denen die Graukarte mit einer Wahrscheinlichkeit p von mindestens 90 % detektiert wird. Während bei einem Visibility Level von 1,505 lediglich die Graukarte auf Objektposition 1 detektiert wird, sind es bei einem Visibility Level von 5,140 bereits 10 Objektpositionen auf denen die Graukarte mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % detektiert wird. Um die Graukarte auf allen betrachteten Objektpositionen zu detektieren, ist ein Visibility Level von 21,500 notwendig.

Durch diese Vorgehensweise ergibt sich das Visibility Level VL als unabhängige Variable und der Anteil der Objektpositionen als abhängige Variable. Um diese beiden Variablen auf Korrelation zu überprüfen, wird

wiederum die vereinfachte psychometrische Funktion nach LINSCHOTEN et al. [114] verwendet (Gleichung 4.3). Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 5.7 dargestellt und zeigt mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,984$, dass eine Korrelation zwischen dem Visibility Level und dem Anteil der Objektpositionen mit einer Detektionswahrscheinlichkeit der Graukarte von mindestens 90 % besteht.

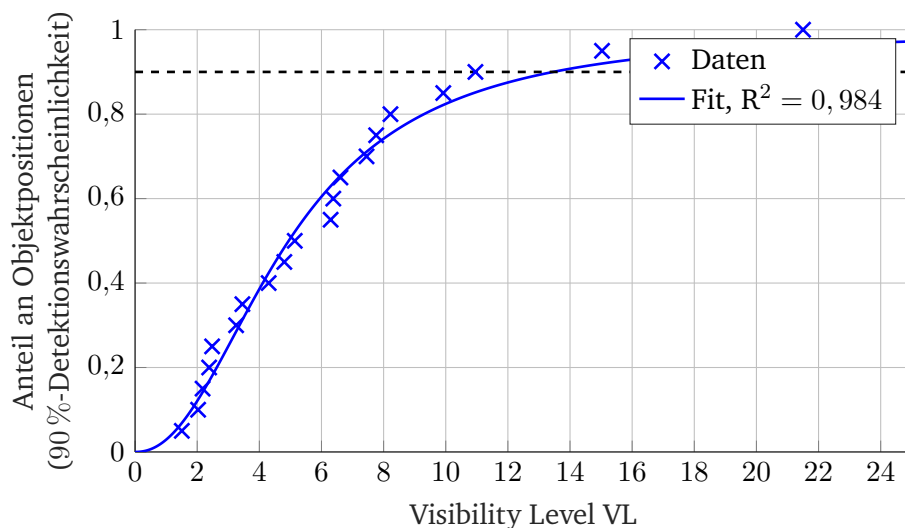


Abbildung 5.7.: Zusammenhang zwischen dem Visibility Level VL und dem Anteil an Objektpositionen im Lichtkanal, bei dem die Graukarte sicher detektiert wird; um die Graukarte auf 90 % der Objektpositionen sicher zu detektieren, wird ein Visibility Level von 13,35 benötigt.

Aus Abbildung 5.7 ist zu entnehmen, dass für eine sichere Detektion der Graukarte auf 90 % der Objektpositionen ein Visibility Level VL von 13,35 erforderlich ist. Wird dem Fahrzeugführer ein Visibility Level von etwa 4,95 zur Verfügung gestellt, so wird eine sichere Detektion der Graukarte auf 50 % der Objektpositionen erreicht. Die 50 %-Schwelle stellt dabei die kritische Schwelle für die Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr dar, da hier die Anzahl der Detektionen und die Anzahl der verpassten Detektionen gleich groß ist.

Um den Einfluss der Umgebungsbedingungen zu analysieren, werden an dieser Stelle die Ergebnisse der Untersuchung auf dem abgesperrten Testgelände dargestellt. Hierzu wird zunächst in Tabelle 5.4 das an den verschiedenen Objektpositionen benötigte Visibility Level VL für eine sichere Objektdetektion betrachtet.

Tabelle 5.4.: Benötigtes Visibility Level VL auf den verschiedenen Objektpositionen auf dem abgesperrten Testgelände

Versatz zur Fahrzeuginnenachse in m	Abstand zum Fahrzeug in m			
	40	60	80	100
-9,00	2,585	25,439	22,967	20,100
-6,00	19,58	24,755	5,219	10,879
-3,00	5,000	13,215	6,772	20,119
3,00	5,750	12,670	4,893	6,243
6,00	4,715	14,960	6,052	7,746
9,00	4,453	14,434	4,817	11,341

Tabelle 5.4 zeigt, dass das benötigte Visibility Level im Bereich von 2,585 bis 25,439 liegt und somit für die sichere Detektion auf dem abgesperrten Testgelände, welches eine realitätsnahe Abbildung des nächtlichen Straßenverkehrs darstellt, höhere Visibility Level erforderlich sind. Um den Einfluss der Umgebung detaillierter zu betrachten werden die Ergebnisse für das abgesperrte Testgelände ebenfalls mit der vereinfachten psychometrischen Funktion analysiert. Abbildung 5.8 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Visibility Level VL und dem Anteil der Objektpositionen auf denen die Graukarte sicher detektiert wird.

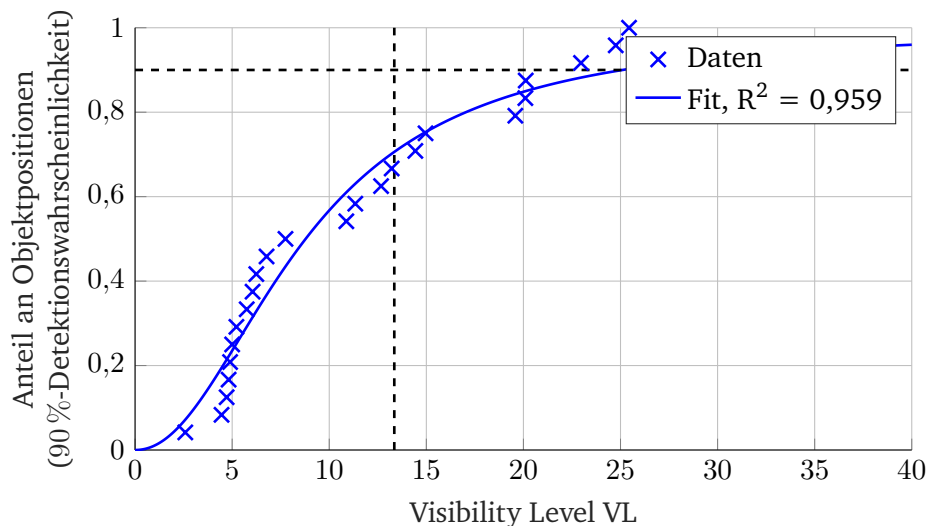


Abbildung 5.8.: Zusammenhang zwischen dem Visibility Level VL und dem Anteil an Objektpositionen auf dem abgesperrten Testgelände, bei dem die Graukarte sicher detektiert wird; während ein Visibility Level von 25 benötigt wird, um die Graukarte auf 90 % der Objektpositionen sicher zu detektieren, wird bei dem im Lichtkanal ermittelten Visibility Level von 13,35 die Graukarte auf mehr als 70 % der Objektpositionen detektiert.

Wie Abbildung 5.8 zeigt, lässt sich der Zusammenhang zwischen dem Visibility Level VL und dem Anteil der sicher detektierbaren Objektpositionen auf dem abgesperrten Testgelände ebenfalls über die psychometrische Funktion beschreiben ($R^2 = 0,959$). Die Erhöhung des benötigten Visibility Levels für die sichere Detektion der Graukarte auf 90 % der Objektpositionen aus Tabelle 5.4 wird durch die Betrachtung der psychometrischen Funktion bestätigt. So wird auf dem abgesperrten Testgelände ein Visibility Level VL von etwa 25 benötigt, um die Graukarte auf 90 % der Objektpositionen sicher zu detektieren. Dies entspricht einer Erhöhung des Visibility Levels um den Faktor 1,87 im Vergleich zum Lichtkanal. Zusätzlich zur 90 %-Schwelle ist in Abbildung 5.8 das Visibility Level von 13,35 aus der Untersuchung im Lichtkanal durch die senkrechte gestrichelte Linie gekennzeichnet. Betrachtet man den Anteil an sicher detektierbaren Objektpositionen bei dem Visibility Level von 13,35 ist festzustellen, dass die Graukarte auf mehr als 70 % der Objektpositionen sicher detektiert wird. Somit wird die kritische 50 %-Schwelle, welche bei einem Visibility Level von etwa 8,8 erreicht wird, durch die Verwendung des im Lichtkanal bestimmten Visibility Levels überschritten.

Für die Auslegung von Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilungen ist somit ein Visibility Level von 13,35 als absolute Minimalanforderung zu gewährleisten, um im nächtlichen Straßenverkehr außerhalb geschlossener Ortschaften passable Detektionsbedingungen ($p > 70\%$) für Fahrzeugführer zu erzeugen.

5.2. Innerhalb geschlossener Ortschaften

Da im Vergleich zum nächtlichen Straßenverkehr außerhalb geschlossener Ortschaften die Beleuchtungssituation des nächtlichen Straßenverkehrs im urbanen Raum neben den Kfz-Frontscheinwerfern maßgeblich durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung bestimmt wird, sind hier die Detektionsbedingungen ebenfalls zu untersuchen. Der größte Unterschied zu den Detektionsbedingungen im außerstädtischen Verkehrsraum ist, dass innerhalb geschlossener Ortschaften neben dem Positivkontrast, welcher durch die Kfz-Frontscheinwerfer erzeugt wird, auch der durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung erzeugte Negativkontrast für die Objektdetektion verfügbar ist. Aus diesem Grund wird in der nachfolgend beschriebenen Studie die gegenseitige Beeinflussung der Straßenbeleuchtung und der Kfz-Frontbeleuchtung und deren Effekt auf die Objektdetektionswahrscheinlichkeit untersucht.

5.2.1. Studienkonzept

Die Studie zu den Detektionsbedingungen wird auf drei für den öffentlichen Verkehr gesperrten Straßen durchgeführt, um variable Beleuchtungssituationen zu erreichen und somit den Effekt der vorhandenen Straßenbeleuchtung auf die Objektdetektion zu untersuchen. In Abbildung 5.9 sind die ausgewählten Teststraßen und in Abbildung 5.10 die dazugehörigen Leuchtdichteaufnahmen in Falschfarbendarstellung zu sehen. Dabei ist Teststraße 1 in beiden Darstellungen oben links, Teststraße 2 oben rechts und Teststraße 3 unten dargestellt. Die ausgewählten Teststraßen sind nach EN 13201 [61–65] den Beleuchtungsklassen M4 bis M6 zuzuordnen.

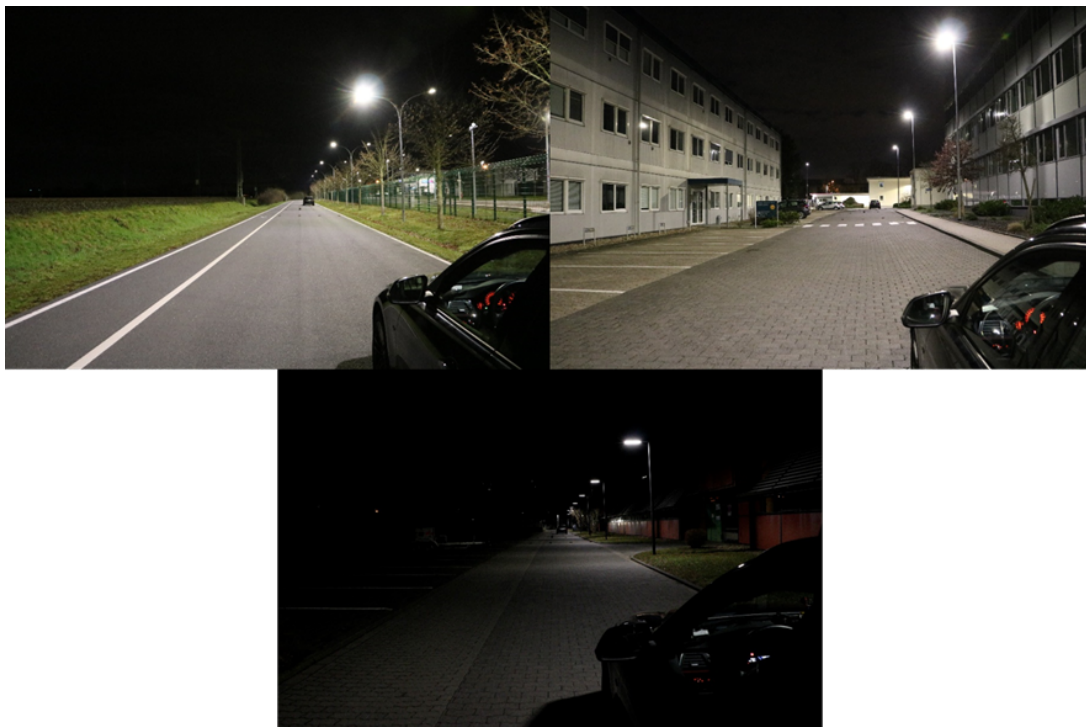


Abbildung 5.9.: Teststraßen, auf denen die Studie durchgeführt wird; Teststraße 1 oben links, Teststraße 2 oben rechts, Teststraße 3 unten.

Aus den Darstellungen in Abbildung 5.9 werden die Helligkeits- und Homogenitätsunterschiede zwischen den drei Teststraßen ersichtlich. Diese Unterschiede werden durch die Leuchtdichteaufnahmen in Abbildung 5.10 verdeutlicht.

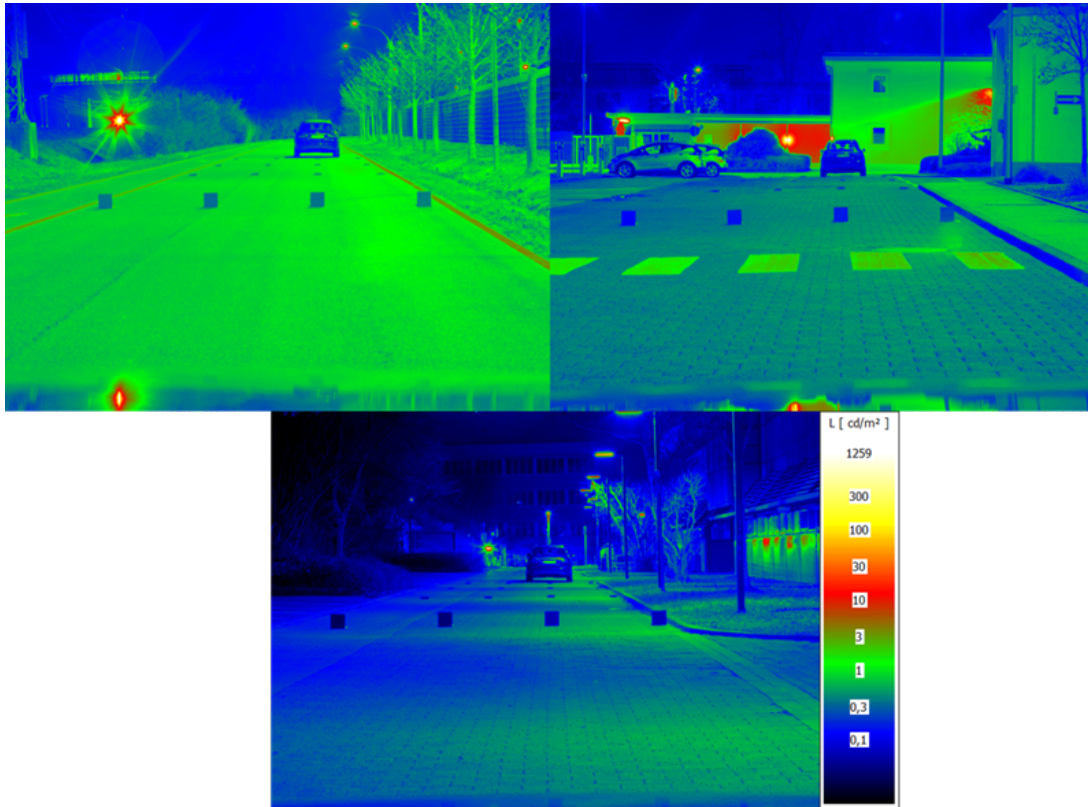


Abbildung 5.10.: Leuchtdichteaufnahmen der Teststraßen, auf denen die Studie durchgeführt wird; oben links: Teststraße 1 ($0,91 \text{ cd m}^{-2}$, Klasse M4), oben rechts: Teststraße 2 ($0,53 \text{ cd m}^{-2}$, Klasse M5), unten: Teststraße 3 ($0,38 \text{ cd m}^{-2}$, Klasse M6); in den Leuchtdichteaufnahmen sind die Helligkeits- und Homogenitätsunterschiede deutlich erkennbar.

Während Teststraße 1 mit einer durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,91 \text{ cd m}^{-2}$ zur Beleuchtungsklasse M4 gezählt wird, wird Teststraße 2 aufgrund ihrer durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,53 \text{ cd m}^{-2}$ der Beleuchtungsklasse M5 und Teststraße 3 mit einer durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,38 \text{ cd m}^{-2}$ der Beleuchtungsklasse M6 zugeordnet. Weitere Charakteristiken, wie die Gesamtgleichmäßigkeit U_0 und die Längsgleichmäßigkeit U_1 sind Tabelle 5.5 zu entnehmen.

Tabelle 5.5.: Charakteristische Merkmale der Teststraßen für die Detektionsstudie innerhalb geschlossener Ortschaften

Teststraße	L_{avg} in cd m^{-2}	U_0	U_1	Beleuchtungsklasse
1	0,91	0,35	0,66	M4
2	0,53	0,30	0,42	M5
3	0,38	0,32	0,40	M6

Als Testfahrzeug wird wie in den bereits beschriebenen Studien der BMW 318d xDrive mit dimmbaren LED-Scheinwerfern verwendet. Dabei wird im Rahmen der Detektionsstudien im urbanen Verkehrsraum das Abblendlicht mit einer 8 Bit-PWM Ansteuerung so eingestellt, dass die Intensität des Abblendlichts in einem Bereich von 0 % bis 100 % variiert wird (siehe Abbildung 4.1).

An der Detektionsstudie innerhalb geschlossener Ortschaften nehmen, bedingt durch die COVID-19-Pandemie, insgesamt 14 Versuchspersonen im Alter von 25 bis 34 Jahren teil, welche im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis sind und bei Bedarf ihre Sehhilfe tragen. Daher wird eine Sehschärfe mit einem Visus von mindestens 0,7 vorausgesetzt und auf einen Sehschärfetest im Rahmen der Studie verzichtet.

Analog zur Detektionsstudie außerhalb geschlossener Ortschaften wird die Objektdetektion auf den drei Teststraßen im urbanen Verkehrsraum ebenfalls mit einem Messraster untersucht. Hierzu werden die 20 cm · 20 cm Graukarten, welche einen Reflexionsgrad ρ von etwa 4% aufweisen, in Abständen von 30 m, 45 m, 55 m und 65 m platziert. Dabei werden, wie in Abbildung 5.11 dargestellt, bei jeder betrachteten Entfernung 4 Objektpositionen für die Graukarten verwendet. Der horizontale Abstand zwischen den einzelnen Objektpositionen beträgt 1,5 m.

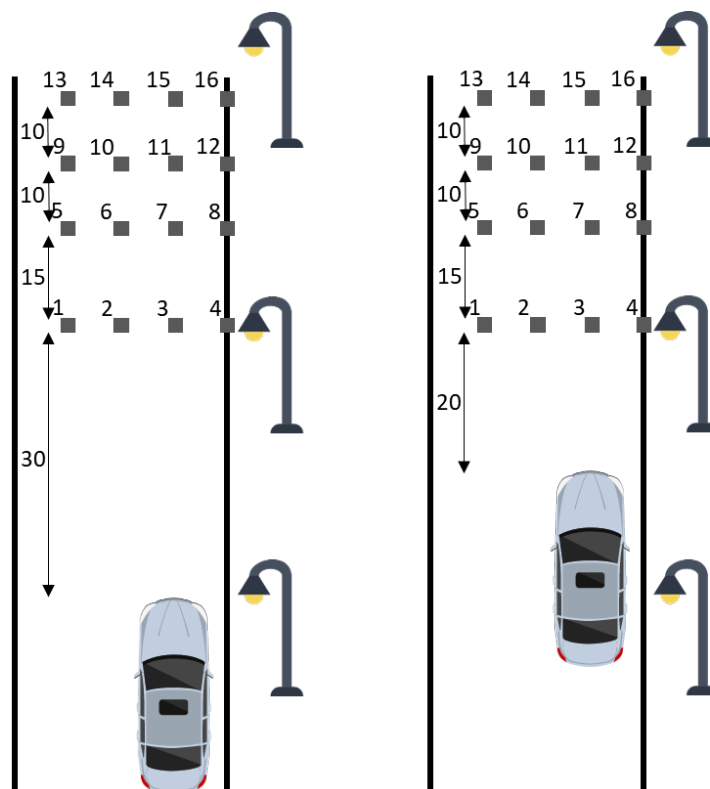


Abbildung 5.11.: Schematische Darstellung der Messraster für die Detektionsstudien innerhalb geschlossener Ortschaften; durch die Fahrzeugposition 1 (links) beträgt die kürzeste Entfernung zum Messraster 30 m, während diese Entfernung bei Fahrzeugposition 2 (rechts) auf 20 m reduziert wird, die Ziffern an den Objektpositionen geben die interne Bezeichnung an.

Wie in Abbildung 5.11 dargestellt, werden zwei Konstellationen des Messrasters für die Detektionsstudien verwendet, um den Einfluss der Fahrzeugposition auf die Detektionsbedingungen im nächtlichen urbanen Verkehrsraum zu untersuchen. So wird das Fahrzeug in der ersten Konstellation direkt unter einer Straßenlaterne positioniert, sodass das Messraster in einer Entfernung von 30 m vor dem Fahrzeug beginnt (siehe Abbildung 5.11 links). Für die zweite Konstellation wird das Testfahrzeug 10 m in Richtung des Messrasters bewegt und somit zwischen 2 Straßenleuchten positioniert. Dadurch, dass das Messraster nicht verändert wird verkürzt sich die Entfernung des Testfahrzeugs zum Messraster von 30 m auf 20 m (siehe Abbildung 5.11 rechts). Die resultierenden Objektpositionen für die beiden Konstellationen werden durch Tabelle 5.6 und

Tabelle 5.7 wiedergegeben.

Tabelle 5.6.: Zuordnung der Objektpositionen zu Messrasterpunkten bei Konstellation 1 der Detektionsstudie im nächtlichen urbanen Verkehrsraum

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abstand zum Fahrzeug in m			
	30	45	55	65
-3,00	Position 1	Position 5	Position 9	Position 13
-1,50	Position 2	Position 6	Position 10	Position 14
0,00	Position 3	Position 7	Position 11	Position 15
1,50	Position 4	Position 8	Position 12	Position 16

Wie aus Tabelle 5.6 anhand des negativen Versatzes zur Fahrzeuglängsachse zu erkennen ist, sind 2 Objektpositionen eher im linken Bereich des Gesichtsfeldes positioniert. Dabei befindet sich eine Objektposition am linken Rand der eigenen Fahrspur (Versatz: $-1,50$ m) und eine Objektposition in der Mitte der Gegenfahrspur (Versatz: $-3,00$ m). Des Weiteren befindet sich eine Objektposition auf der Fahrzeuglängsachse (Versatz: $0,00$ m) und eine auf dem rechten Fahrbahnrand (Versatz: $1,50$ m). Der Unterschied zwischen dem Messraster in Konstellation 2 und Konstellation 1 liegt in der Verkürzung der Entfernungen der Objektreihen zum Testfahrzeug um 10 m (siehe Tabelle 5.7). Die horizontale Verteilung der Objekte ist für beide Konstellationen identisch.

Tabelle 5.7.: Zuordnung der Objektpositionen zu Messrasterpunkten bei Konstellation 2 der Detektionsstudie im nächtlichen urbanen Verkehrsraum

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abstand zum Fahrzeug in m			
	20	35	45	55
-3,00	Position 1	Position 5	Position 9	Position 13
-1,50	Position 2	Position 6	Position 10	Position 14
0,00	Position 3	Position 7	Position 11	Position 15
1,50	Position 4	Position 8	Position 12	Position 16

Die Durchführung beginnt mit der Adaptationsphase der Versuchspersonen, welche auf die Umgebungslichtbedingungen adaptieren, während sie die Instruktionen vom Versuchsleiter erhalten. Diese Adaptationsphase beträgt mindestens 15 min. Im Anschluss beginnt der Hauptteil der Studie. Die Versuchsperson sitzt auf dem Fahrersitz und fixiert das Fixationsobjekt, welches in Form eines zweiten Fahrzeugs hinter der letzten Objektreihe erscheint (siehe Abbildung 5.10). Die Testobjekte werden in zufälliger Reihenfolge präsentiert, und für jede Position des Testobjekts wird die Intensität der Abblendlichtfunktion der Scheinwerfer schrittweise erhöht. Für jede voreingestellte Intensität der Abblendlichtfunktion signalisiert die Versuchsperson die Detektion des Testobjekts durch eine „Ja/Nein“-Antwort. In dieser Studie werden die Versuchspersonen gebeten, bei allen Intensitätsstufen des Abblendlichts eine Antwort zu geben. Somit werden Intensitätsstufen, welche zwischen den Minimal- und Maximalwerten der Abblendlichtintensität liegen und zu einer Kontrastreduktion führen könnten, ebenfalls berücksichtigt. Diese Kontrastreduktion wird durch die gegenseitige Aufhebung des durch die Straßenbeleuchtung vorhandenen Negativkontrasts und des durch das Abblendlicht erzeugten Positivkontrasts verursacht und erschwert die Objektdetektion.

Nachdem der Detektionstest für die Graukarte auf einer Objektposition mit allen Intensitätsstufen des Abblendlichts abgeschlossen ist, wird die Untersuchung mit der nächsten Objektposition auf die gleiche Weise

fortgeführt, bis alle 16 Objektpositionen der Versuchsperson präsentiert worden sind. Anschließend wird das Testfahrzeug auf die zweite Fahrzeugposition bewegt und die Studie mit allen 16 Objektpositionen erneut durchgeführt. Dabei ist sowohl die Reihenfolge der Objektpositionen als auch die Startposition des Fahrzeugs randomisiert, um Lerneffekte zu vermeiden.

Auf diese Weise werden die Detektionsuntersuchungen mit den gleichen 14 Versuchspersonen auf allen drei Teststraßen durchgeführt. Aus logistischen Gründen wird pro Versuchsabend lediglich eine Teststraße untersucht. Aufgrund der Verfügbarkeit der Versuchspersonen und der Teststraßen ergeben sich somit unterschiedliche Reihenfolgen der Teststraßen für die einzelnen Versuchspersonen, weshalb keine Reihenfolgeeffekte zu erwarten sind.

5.2.2. Ergebnisse

Begonnen wird die Auswertung der Studienergebnisse mit den photometrischen Daten. Hierzu werden die aufgezeichneten Leuchtdichteaufnahmen analysiert, um die Kontrastverhältnisse für die Graukarten auf den einzelnen Objektpositionen bei den verschiedenen Intensitätsstufen des Abblendlichts zu bestimmen. Hierzu wird die Objektleuchtdichte L_O und die Umfeldleuchtdichte L_U (Mittelwert der Umfeldleuchtdichten der 4 angrenzenden Bereiche) bestimmt und der Weberkontrast K_W in Abhängigkeit der eingestellten PWM-Stufe des Abblendlichts betrachtet. Die Ergebnisse für Teststraße 1 in der ersten Konstellation sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Die Abbildung besteht dabei aus 4 Unterabbildungen. So sind oben links in Abbildung 5.12 die Ergebnisse für die 4 Objektpositionen in einer Entfernung von 30 m dargestellt. Rechts oben sind die Ergebnisse für eine Objektentfernung von 45 m zu sehen. Des Weiteren sind im unteren Bereich von Abbildung 5.12 auf der linken Seite die Ergebnisse für die Objektpositionen in 55 m Entfernung und auf der rechten Seite für die Objekte in 65 m Entfernung dargestellt. In allen Unterabbildungen werden die Ergebnisse für die Objektpositionen mit einem Versatz zur Fahrzeuglängsachse von $-3,00$ m in blau, $-1,50$ m in rot, $0,00$ m in gelb und mit einem horizontalen Versatz von $1,50$ m in lila dargestellt. Zusätzlich wird durch die schwarze gestrichelte Linie der Weberkontrast K_W von 0 markiert, welcher den Übergang vom Negativkontrast zum Positivkontrast darstellt.

Aus Abbildung 5.12 ist ersichtlich, dass die Abblendlichtintensität einen erheblichen Einfluss auf die Kontrastpolarität und den Kontrastbetrag der Graukarten auf den verschiedenen Objektpositionen hat. So weisen die Graukarten auf allen Objektpositionen zunächst einen Negativkontrast auf, wenn das Abblendlicht des Testfahrzeugs vollständig ausgeschaltet ist und somit die Beleuchtungssituation ausschließlich durch die vorhandene ortsfeste Straßenbeleuchtung bestimmt wird. Mit Erhöhung der Abblendlichtintensität wird deutlich, dass der Kontrastbetrag sinkt bis er im Falle der Objektentfernung von 30 m den Übergangspunkt zwischen Negativ- und Positivkontrast erreicht. So wechselt die Kontrastpolarität der Graukarte bei den Objektpositionen in 30 m Entfernung vom Negativ- zum Positivkontrast, wenn die Abblendlichtintensität im Bereich zwischen 30 % und 50 % bezogen auf die Maximalintensität liegt. Wird die Abblendlichtintensität weiter erhöht, so steigt der Betrag des Positivkontrastes der Graukarte gegenüber ihrer unmittelbaren Umgebung. Abbildung 5.12 zeigt zusätzlich, dass die Abblendlichtintensität, bei welcher der Übergang vom Negativkontrast zum Positivkontrast erfolgt, von der Entfernung zum Objekt abhängig ist. So wird bei der ersten Konstellation auf Teststraße 1, welche einer Straße der Klasse M4 entspricht, der Übergangspunkt $K_W = 0$ bei einer Objektentfernung von 45 m erst ab einer prozentualen Abblendlichtintensität von etwa 80 % erreicht.

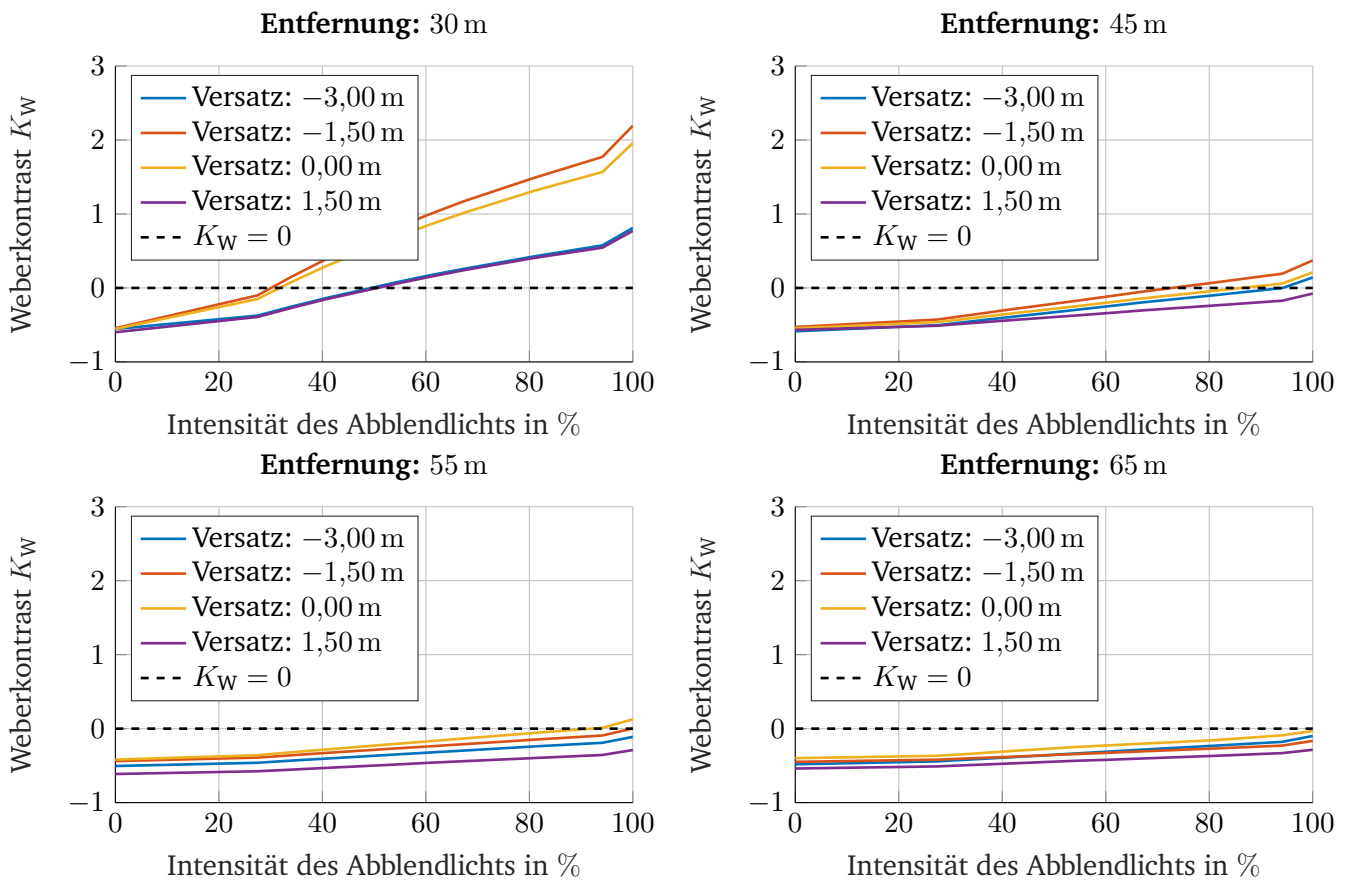


Abbildung 5.12.: Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 1 bei Konstellation 1.

Werden die beiden Objektentfernungen von 55 m und 65 m betrachtet, so ist festzustellen, dass erst bei voller Abblendlichtintensität der Übergangspunkt entweder knapp (siehe Abbildung 5.12 unten links) oder überhaupt nicht erreicht wird (siehe Abbildung 5.12 unten rechts).

Der Vergleich des Kontrastbetrags für die beiden Extremfälle 0 % Abblendlichtintensität und 100 % Abblendlichtintensität zeigt, dass lediglich bei einer Objektentfernung von 30 m der Kontrastbetrag, welcher durch das vollständig eingeschaltete Abblendlicht erzeugt wird, mindestens so groß ist wie der Kontrastbetrag bei ausgeschaltetem Abblendlicht. Somit stellt die Verwendung des Abblendlichts für die Objektentfernungen 45 m, 55 m und 65 m eine Verschlechterung der Kontrastverhältnisse dar, anstatt diese zu verbessern.

Inwieweit die Kontrastverhältnisse durch die vorhandene Straßenbeleuchtung beeinflusst werden, wird anhand der zwei weiteren Teststraßen analysiert. Hierfür werden die Ergebnisse für den Kontrastverlauf bei der ersten Konstellation auf Teststraße 2, welche die Beleuchtungskategorie M5 aufweist, in Abbildung 5.13 betrachtet. Erneut ist der Kontrastverlauf für die vier horizontalen Positionen bei einer Entfernung von 30 m oben links, von 45 m oben rechts, von 55 m unten links und bei einer Entfernung von 65 m unten rechts dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass im Gegensatz zu Teststraße 1 auf allen 16 Objektpositionen auf Teststraße 2 der Übergangspunkt $K_W = 0$ durch eine Erhöhung der Abblendlichtintensität erreicht wird.

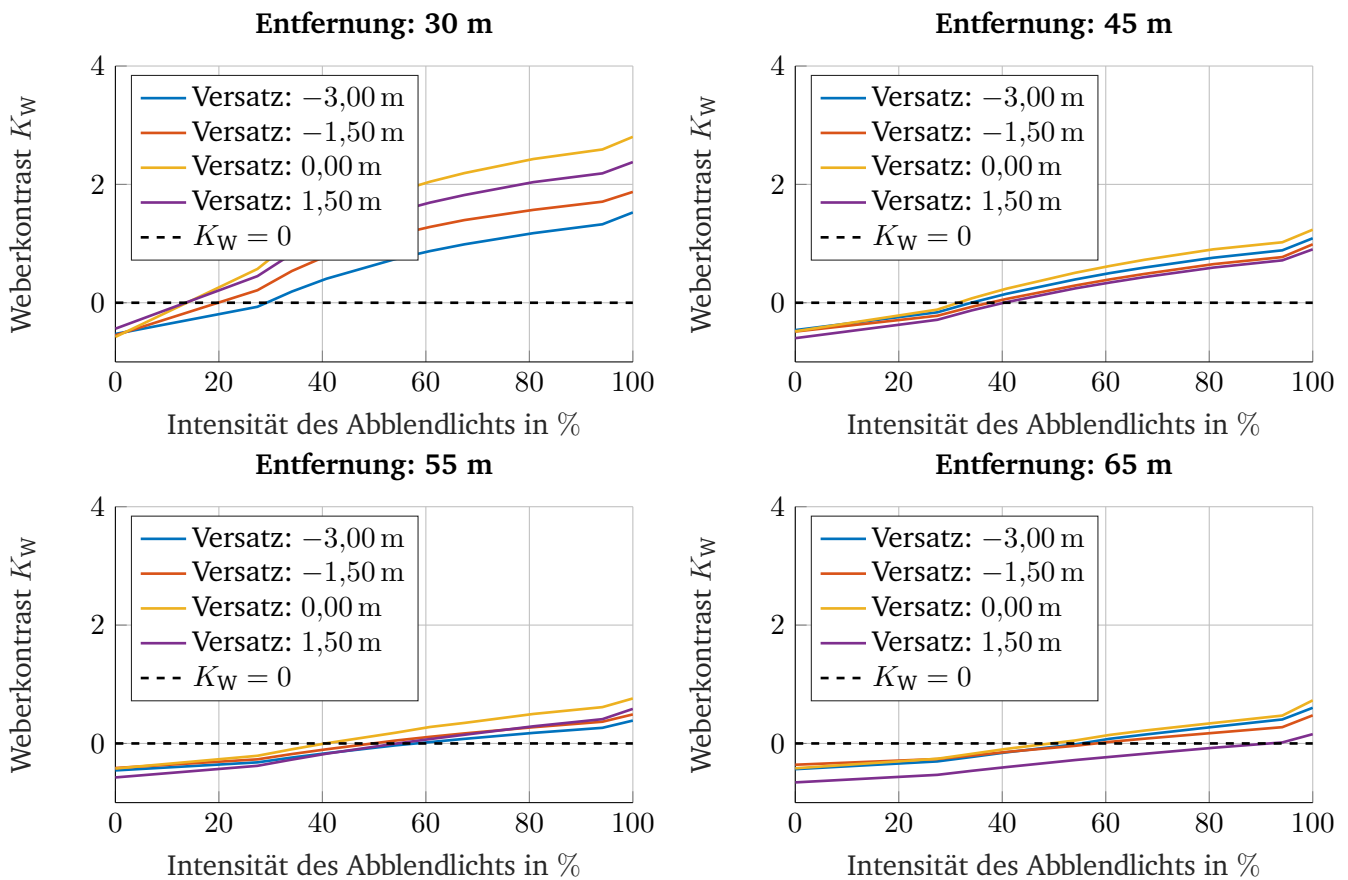


Abbildung 5.13.: Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 2 bei Konstellation 1.

Außerdem wird aus Abbildung 5.13 deutlich, dass geringere Abblendlichtintensitäten für das Erreichen dieses Übergangspunktes erforderlich sind. So wird der Wert $K_W = 0$ bei einer Entfernung von 30 m bereits bei Abblendlichtintensitäten von 10 % bis 30 % erreicht (siehe Abbildung 5.13 oben links). Des Weiteren ist in Abbildung 5.13 zu sehen, dass die Abblendlichtintensität, welche zum Erreichen des Übergangspunktes $K_W = 0$ benötigt wird, mit steigender Entfernung ebenfalls steigt. Während bei einer Entfernung von 45 m die erforderliche Abblendlichtintensität zwischen 30 % und 40 % liegt, ist bei einer Entfernung von 55 m bereits eine Abblendlichtintensität zwischen 40 % und 60 % notwendig. Bei einer Entfernung von 65 m ist ein weiterer Anstieg der erforderlichen Abblendlichtintensität auf bis zu 90 % zu verzeichnen, wie der Kontrastverlauf bei einem horizontalen Versatz von 1,50 m zeigt (Abbildung 5.13 unten rechts).

Wird die erste Konstellation auf Teststraße 3, welche mit der Beleuchtungskategorie M6 am dunkelsten ausgeleuchtet ist, in Abbildung 5.14 betrachtet, so zeigt sich eine Fortführung dieses Trends. So wird auf Teststraße 3 bei allen betrachteten Objektpositionen der Übergangspunkt K_W durch die Erhöhung der Abblendlichtintensität erreicht und es findet ein Übergang vom Negativ- zum Positivkontrast statt. Auf Teststraße 3 zeigt sich ebenfalls die Abstandsabhängigkeit der Effektivität des Abblendlichts. Während bei einer Entfernung von 30 m eine relative Abblendlichtintensität von 10 % bis 30 % zum Erreichen des Übergangspunktes ausreicht, beträgt diese bei einer Entfernung von 65 m bereits 50 % bis 60 %.

Im Anhang A.4 sind die Ergebnisse der Kontrastauswertung für die zweite Konstellation auf den drei Teststraßen abgebildet.

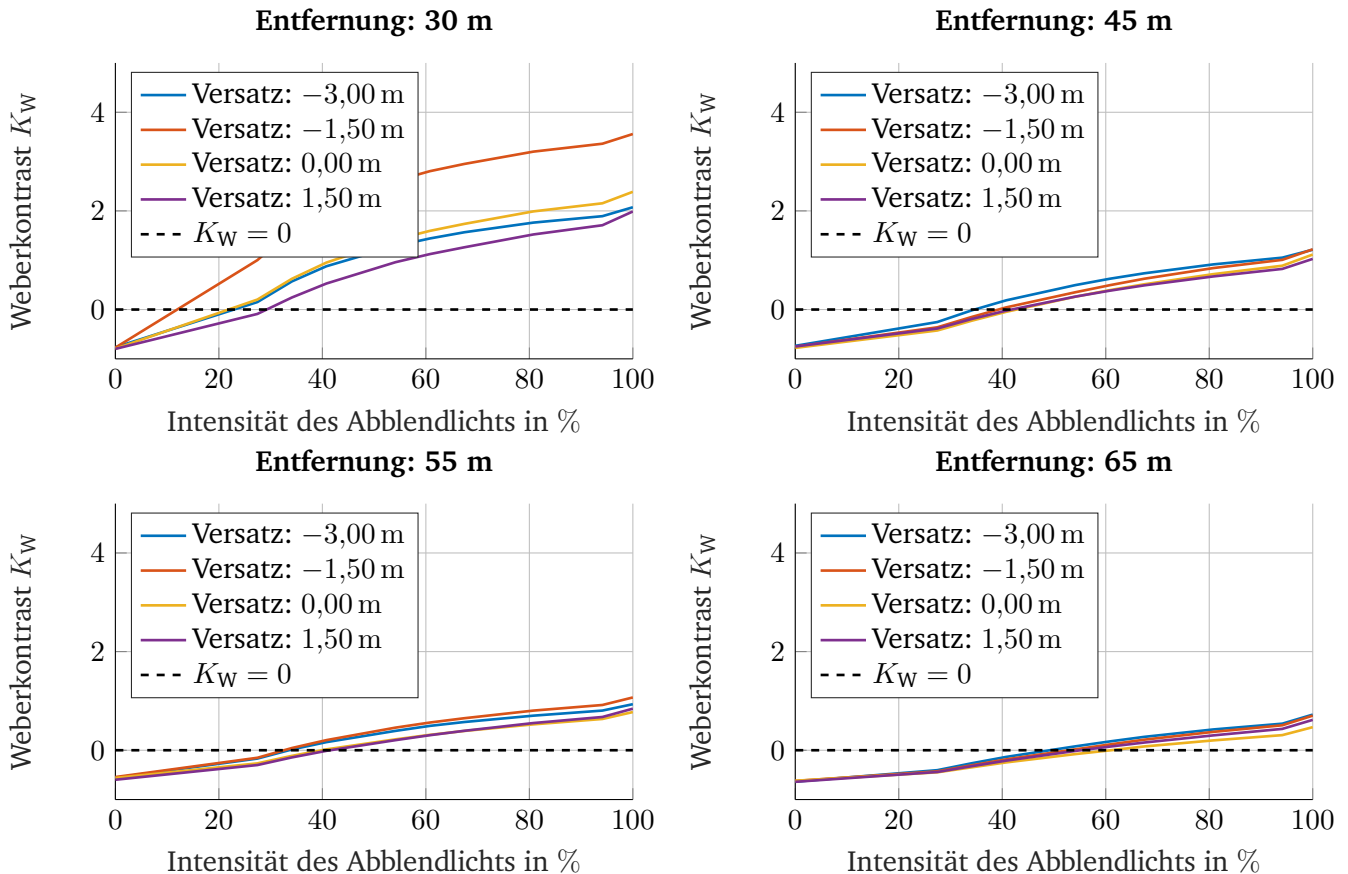


Abbildung 5.14.: Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 3 bei Konstellation 1.

Abbildung 5.12, Abbildung 5.13 und Abbildung 5.14 verdeutlichen einige Besonderheiten der Detektionsbedingungen im nächtlichen urbanen Straßenverkehr. So wird bei ausgeschaltetem Abblendlicht durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung allein ein deutlicher Negativkontrast zwischen der Graukarte und deren Umfeld erzeugt. Durch die Erhöhung der Abblendlichtintensität bleibt der Negativkontrast zunächst bestehen, jedoch wird der Kontrastbetrag reduziert. Wird die Abblendlichtintensität weiter erhöht, so resultieren daraus zwei unterschiedliche Effekte. Einerseits wird durch die weitere Steigerung der Abblendlichtintensität der Übergangspunkt $K_W = 0$ erreicht und es findet ein Übergang vom Negativ- zum Positivkontrast statt. Dieser Positivkontrast wird maximiert, indem die relative Abblendlichtintensität auf 100 % angehoben wird. Andererseits existieren vor allem auf Teststraße 1, welche der Beleuchtungsklasse M4 zuzuordnen ist, Situationen, bei denen dieser Übergangspunkt nicht erreicht wird. Somit führt eine relative Abblendlichtintensität von 100 % zu einer Minimierung des vorhandenen Negativkontrastes und verschlechtert somit die Detektionsbedingungen erheblich. In Tabelle 5.8 sind die resultierenden Detektionsbedingungen für die Extremwerte der relativen Abblendlichtintensität von 0 % und 100 % zusammengefasst.

Tabelle 5.8.: Detektionsbedingungen bei den einstellbaren Extremwerten für die relative Abblendlichtintensität

Relative Abblendlichtintensität in %	Wird $K_W = 0$ erreicht?	Detektionsbedingung
0	Nicht relevant	Maximal möglicher Negativkontrast
100	Ja	Maximal möglicher Positivkontrast
100	Nein	Minimal möglicher Negativkontrast

Zur Veranschaulichung der beiden Effekte dienen die in Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 dargestellten Leuchtdichteaufnahmen. Dabei zeigt Abbildung 5.15 die Detektionsbedingungen für den Fall, dass durch die Erhöhung der Abblendlichtintensität ein Übergang vom Negativ- zum Positivkontrast stattfindet.



Abbildung 5.15.: Leuchtdichteaufnahmen zur Veranschaulichung des Kontrastverlaufs vom Negativ- zum Positivkontrast im nächtlichen urbanen Verkehrsraum; die beiden Objekte in der Mitte sind durch den Negativkontrast deutlich sichtbar (links), eine Erhöhung der Abblendlichtintensität führt zu einer Kontrastaufhebung und lässt die Objekte verschwinden (mitte), eine weitere Erhöhung der Abblendlichtintensität lässt die Objekte durch den sich ergebenden Positivkontrast wieder sichtbar werden (rechts).

Werden die beiden durch weiße Kreise markierten Graukarten in der linken Leuchtdichteaufnahme in Abbildung 5.15 betrachtet, so ist festzustellen, dass diese bei ausgeschaltetem Abblendlicht aufgrund des von der ortsfesten Straßenbeleuchtung erzeugten Negativkontrasts deutlich zu detektieren sind. Wird die Abblendlichtintensität erhöht, so wird der vorhandene Negativkontrast reduziert und der Übergangspunkt $K_W = 0$ erreicht, an dem der Negativkontrast der Straßenbeleuchtung und der durch das Abblendlicht erzeugte Positivkontrast sich gerade aufheben. Infolgedessen scheinen die Graukarten im Sichtfeld zu verschwinden und sind nicht mehr detektierbar (siehe Abbildung 5.15 Mitte). Falls eine weitere Erhöhung der Abblendlichtintensität realisierbar ist, wird der Übergangspunkt $K_W = 0$ verlassen und der Betrag des Positivkontrasts erhöht. Dadurch werden die Graukarten, wie in der rechten Leuchtdichteaufnahme in Abbildung 5.15 zu sehen, aufgrund des nun vorhandenen Positivkontrasts erneut sichtbar.

Findet der Übergang zwischen Negativ- und Positivkontrast nicht statt, so ist die Erhöhung der Abblendlichtintensität lediglich mit der Reduzierung des durch die Straßenbeleuchtung erzeugten Negativkontrasts verbunden und führt zu einer Verschlechterung der Detektionsbedingungen für den Fahrzeugführer. Dieser Effekt wird in Abbildung 5.16 veranschaulicht.

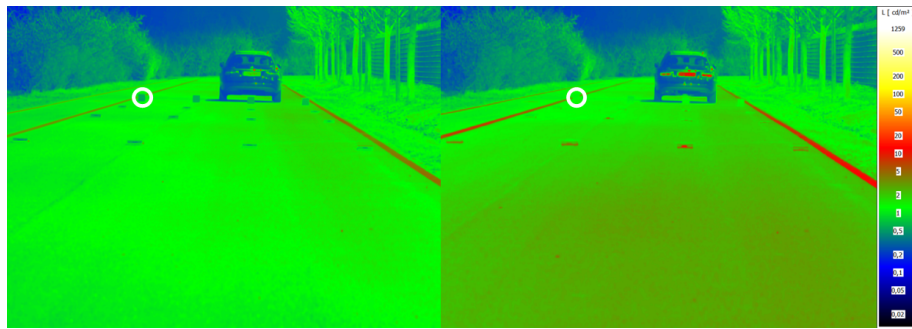


Abbildung 5.16.: Leuchtdichteaufnahmen zur Veranschaulichung der durch die Erhöhung der Abblendlichtintensität erzeugten Kontrastreduktion im nächtlichen urbanen Verkehrsraum; während die durch den weißen Kreis markierte Graukarte bei ausgeschaltetem Abblendlicht aufgrund des Negativkontrast deutlich sichtbar ist (links), wird die Detektion durch die Kontrastreduktion mit zunehmender Abblendlichtintensität erschwert (rechts).

Wie die linke Leuchtdichteaufnahme in Abbildung 5.16 zeigt, ist die mit einem weißen Kreis markierte Graukarte aufgrund des Negativkontrasts, welcher durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung bei ausgeschaltetem Abblendlicht erzeugt wird, deutlich sichtbar. Wird der Übergangspunkt $K_W = 0$ durch eine Erhöhung der Abblendlichtintensität nicht erreicht und anschließend überschritten, so ist die Erhöhung der Abblendlichtintensität mit einer stetigen Kontrastreduktion verbunden. Dies führt dazu, dass die Detektion der Graukarte, wie in Abbildung 5.16 rechts dargestellt, trotz einer relativen Abblendlichtintensität von 100 % im Vergleich zu ausgeschaltetem Abblendlicht deutlich erschwert ist.

Die Kontrastbestimmung aus den Leuchtdichteaufnahmen zeigt, dass auf allen drei Teststraßen die Extremfälle der Abblendlicteinstellungen die kritischen und damit für die weitere Auswertung relevanten Fälle darstellen. Daher werden im nächsten Schritt der Auswertung die Visibility Level VL der Graukarten bei ausgeschaltetem Abblendlicht (0 % Abblendlichtintensität) und vollständig eingeschaltetem Abblendlicht (100 % Abblendlichtintensität) mithilfe von Gleichung 3.5 und Gleichung 3.6 berechnet und anschließend mit dem kritischen Visibility Level VL von 7, welches durch Studien von BACELAR et al. [17] und BUYUKKINACI et al. [45] für eine mindestens passable Detektion als notwendig bestimmt wird, verglichen. Tabelle 5.9 sind die berechneten Visibility Level VL für die erste Konstellation auf Teststraße 1 zu entnehmen.

Tabelle 5.9.: Berechnete Visibility Level VL für die erste Konstellation auf Teststraße 1

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abblendlichtintensität 0 %				Abblendlichtintensität 100 %			
	Abstand zum Fahrzeug in m				Abstand zum Fahrzeug in m			
	30	45	55	65	30	45	55	65
-3,00	33,70	24,91	17,23	13,44	31,87	4,00	4,03	2,92
-1,50	33,33	22,27	14,82	12,51	88,68	10,34	0,06	4,78
0,00	35,18	24,03	14,01	10,96	81,46	6,12	2,85	0,91
1,50	40,21	28,21	24,07	17,12	33,19	4,09	12,06	9,56

Wie in Tabelle 5.9 zu sehen, ist bei ausgeschaltetem Abblendlicht (0 % Intensität) das Visibility Level der Graukarte auf allen betrachteten Objektpositionen größer als 7. Somit würde auf allen betrachteten Objektpositionen eine passable Detektion durch den Negativkontrast, welcher durch die Straßenbeleuchtung erzeugt wird, erreicht werden. Außerdem ist zu beobachten, dass das Visibility Level VL mit steigender Entfernung

sinkt. Wird das Visibility Level VL bei einer Abblendlichtintensität von 100 % betrachtet, so fällt auf, dass das Visibility Level der Graukarte lediglich auf zwei von 16 Objektpositionen größer ist als bei ausgeschaltetem Abblendlicht. Diese Graukarten sind mit einer Entfernung von 30 m in der kürzesten Entfernung zum Testfahrzeug positioniert, die in der ersten Konstellation betrachtet wird. Außerdem ist aus Tabelle 5.9 die Abstandsabhängigkeit der Effektivität der Abblendlichtintensität zu erkennen. Bereits ab einer Entfernung von 45 m weisen die ersten Objektpositionen Visibility Level auf, die geringer sind als 7. Insgesamt erreicht die Graukarte lediglich auf sieben von 16 betrachteten Objektpositionen ein Visibility Level, welches größer als 7 ist. Besonders kritische Detektionsbedingungen herrschen dabei auf zwei Objektpositionen, bei denen das Visibility Level einen kleineren Wert als 1 annimmt, da hier die Schwellenleuchtdichtedifferenz aus dem STV Modell ebenfalls unterschritten wird.

Somit zeigen die berechneten Ergebnisse auf Teststraße 1, welche der Beleuchtungsklasse M4 zuzuordnen ist, dass die Detektionsbedingungen aufgrund des Negativkontrastes bei ausgeschaltetem Abblendlicht günstiger sind als bei einer relativen Abblendlichtintensität von 100 %.

Bei Betrachtung der Ergebnisse für die erste Konstellation auf Teststraße 2 (Beleuchtungsklasse M5) in Tabelle 5.10, zeigt sich der gleiche Trend wie bereits bei der Betrachtung des Weberkontrastes K_W . So zeigt sich zunächst, dass das Visibility Level VL bei ausgeschaltetem Abblendlicht aufgrund der geringeren Ausleuchtung der Fahrbahn durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung geringer ausfällt als auf der heller ausgeleuchteten Teststraße 1. Dennoch weist die Graukarte auf allen betrachteten Objektpositionen ein Visibility Level VL auf, welches größer als 7 ist und somit passable Detektionsbedingungen vorhersagt.

Tabelle 5.10.: Berechnete Visibility Level VL für die erste Konstellation auf Teststraße 2

Versatz zur Fahrzeuginnenachse in m	Abblendlichtintensität 0 %				Abblendlichtintensität 100 %			
	Abstand zum Fahrzeug in m				Abstand zum Fahrzeug in m			
	30	45	55	65	30	45	55	65
-3,00	25,35	14,62	11,28	8,76	53,81	24,97	6,91	8,31
-1,50	27,75	16,47	10,31	7,23	74,27	23,82	8,96	6,46
0,00	30,14	16,42	10,75	8,21	116,84	31,59	14,69	10,05
1,50	21,80	21,03	16,73	16,00	93,59	23,24	12,53	2,84

Werden die Werte für das Visibility Level auf den verschiedenen Objektpositionen bei einer Abblendlichtintensität von 100 % betrachtet, so ist, wie bereits in Abbildung 5.13 gezeigt, die Abhängigkeit der Abblendlichteffektivität von der durch die Straßenbeleuchtung hervorgerufenen Beleuchtungssituation zu erkennen. So werden bei der kürzesten Entfernung von 30 m Visibility Level von bis zu 116,84 erreicht. Des Weiteren fällt das Visibility Level bei der relativen Abblendlichtintensität von 100 % erst bei Entfernungen ab 55 m unter das Visibility Level, welches bei ausgeschaltetem Abblendlicht erreicht wird. Zusätzlich steigt die Anzahl der Objektpositionen mit einem Visibility Level, das größer als 7 ist, im Vergleich zu Teststraße 1 von sieben auf 13 von 16 und das Visibility Level von 1 wird auf keiner der Objektpositionen unterschritten.

Der Trend setzt sich, wie in Tabelle 5.11 zu sehen, bei Teststraße 3 (Beleuchtungsklasse M6) ebenfalls fort. So werden bei ausgeschaltetem Abblendlicht erneut auf allen betrachteten Objektpositionen passable Detektionsbedingungen geschaffen, da das Visibility Level größer als 7 ist. Bei einer Abblendlichtintensität von 100 % ist dies bei 15 von 16 Objektpositionen der Fall. Des Weiteren sinkt das Visibility Level VL bei einer Abblendlichtintensität von 100 % erst ab einer Entfernung von 65 m unter das Visibility Level, welches bei ausgeschaltetem Abblendlicht durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung erzeugt wird. Somit wird sowohl die Abhängigkeit von der durch die Straßenbeleuchtung hervorgerufenen Beleuchtungssituation als auch die

Abstandsabhängigkeit der Abblendlichteffektivität im nächtlichen urbanen Verkehrsraum durch die Ergebnisse auf Teststraße 3 bestätigt.

Tabelle 5.11.: Berechnete Visibility Level VL für die erste Konstellation auf Teststraße 3

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abblendlichtintensität 0 %				Abblendlichtintensität 100 %			
	Abstand zum Fahrzeug in m				Abstand zum Fahrzeug in m			
	30	45	55	65	30	45	55	65
-3,00	29,72	19,38	10,90	10,20	67,73	25,64	15,31	8,80
-1,50	33,23	22,59	11,55	11,00	135,30	27,81	18,94	9,21
0,00	40,42	27,04	13,55	12,10	94,41	28,66	15,18	6,84
1,50	41,50	25,45	15,75	13,80	74,88	26,01	17,38	10,04

Für die Ergebnisse auf den drei Teststraßen bei der zweiten Messraster-Konstellation sei an dieser Stelle auf Anhang A.5 verwiesen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Visibility Level Auswertung, dass auf allen drei Teststraßen und Objektpositionen die Nutzung des Negativkontrasts, welcher bei ausgeschaltetem Abblendlicht durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung erzeugt wird, passable Detektionsbedingungen hervorruft. Des Weiteren wird durch die berechneten Visibility Level VL auf den drei Teststraßen verdeutlicht, dass die Effektivität der Abblendlichtnutzung stark von der bereits vorhandenen Straßenbeleuchtungssituation und der Entfernung vom Testfahrzeug zum Detektionsobjekt abhängt. Außerdem zeigen die berechneten Visibility Level für die kürzeste Objektentfernung von 30 m mit Werten von bis zu 135,30, dass die Abblendlichtintensität bei kurzen Entfernungen für die Detektionsaufgabe deutlich überdimensioniert ist. Somit schafft das von der Straßenbeleuchtung allein erzeugte Visibility Level (Abblendlichtintensität 0 %) robustere Detektionsbedingungen als die Kombination aus Straßenbeleuchtung und vollständig eingeschaltetem Abblendlicht.

Eine eindeutige Ableitung einer Abstands- oder Winkelabhängigkeit des Visibility Levels ist aufgrund der unterschiedlichen und komplexen Beleuchtungssituationen im urbanen Verkehrsraum, welche durch die Kombination der Straßenbeleuchtung und Kfz-Beleuchtung entsteht, hingegen nicht möglich.

Um die Prädiktion der Detektionsbedingungen aus den photometrischen Daten und deren Auswertung zu validieren, werden im nächsten Schritt die Ergebnisse der Detektionsstudie ausgewertet. Hierzu wird auf allen drei Teststraßen in beiden Konstellationen der Anteil der insgesamt 14 Versuchspersonen bestimmt, welche die Graukarte auf der jeweiligen Objektposition bei ausgeschaltetem Abblendlicht und bei einer Abblendlichtintensität von 100 % detektiert haben. Daraus ergibt sich eine bestimmte Detektionswahrscheinlichkeit für jede Objektposition. So ergibt sich beispielsweise eine Detektionswahrscheinlichkeit von 85,7 %, wenn zwölf von 14 Versuchspersonen das Objekt detektiert haben. Anschließend wird die Anzahl der Objektpositionen mit einer Detektionswahrscheinlichkeit größer als der betrachtete Schwellenwert aufsummiert. Als Schwellenwerte werden dabei Detektionswahrscheinlichkeiten p von 90 %, 70 % und 50 % verwendet. Der Schwellenwert von 90 % stellt die Schwelle für eine sichere Detektion, 70 % die Schwelle für eine passable Detektion und 50 % die kritische Schwelle dar, die nicht unterschritten werden darf, da sonst das Objekt in der Mehrzahl der Fälle nicht detektiert werden würde. Tabelle 5.12 zeigt die Ergebnisse dieser Auswertung für die erste Messraster-Konstellation. Die Ergebnisse bei der zweiten Messraster-Konstellation ist aus Analogiegründen Anhang A.6 zu entnehmen.

Tabelle 5.12.: Anteil an detektierten Objektpositionen für die erste Konstellation auf den untersuchten Teststraßen

Teststraße	Abblendlichtintensität 0 %			Abblendlichtintensität 100 %		
	$p > 90\%$	$p > 70\%$	$p > 50\%$	$p > 90\%$	$p > 70\%$	$p > 50\%$
1	15/16	16/16	16/16	6/16	9/16	12/16
2	12/16	15/16	15/16	10/16	12/16	13/16
3	14/16	16/16	16/16	12/16	14/16	15/16

Tabelle 5.12 zeigt, dass bei ausgeschaltetem Abblendlicht in der ersten Messraster-Konstellation der durch die Straßenbeleuchtung erzeugte Negativkontrast dazu führt, dass die Graukarte an mehr Objektpositionen detektiert wird als bei einer Abblendlichtintensität von 100 %. Dies ist für alle drei Teststraßen und alle betrachteten Wahrscheinlichkeitsschwellen der Fall. Besonders deutlich wird dies bei Teststraße 1 mit einer durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $0,91 \text{ cd m}^{-2}$. Hier wird bei einer Abblendlichtintensität von 100 % die Graukarte lediglich auf sechs von 16 Objektpositionen mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90 % detektiert, während bei ausgeschaltetem Abblendlicht die Graukarte bereits auf 15 von 16 Objektpositionen mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90 % detektiert wird. Auffallend ist auch, dass bei eingeschaltetem Abblendlicht die Detektionswahrscheinlichkeit für die Graukarte lediglich auf zwölf von 16 Objektpositionen auf der Teststraße 1 über der kritischen Schwelle von 50 % liegt. Werden die beiden dunkleren Teststraßen betrachtet, so ist festzustellen, dass die Anteile der detektierten Objektpositionen bei den betrachteten Wahrscheinlichkeitsschwellen bei ausgeschaltetem Abblendlicht und einer Abblendlichtintensität von 100 % sich annähern. Des Weiteren ist anzumerken, dass bei ausgeschaltetem Abblendlicht alle Objektpositionen mit einer passablen Wahrscheinlichkeit von mindestens 70 % detektiert werden mit Ausnahme einer Objektposition auf Teststraße 2. Die Besonderheit dieser Objektposition wird durch Abbildung 5.17 aufgezeigt. Es handelt sich dabei um die Objektposition, welche sich direkt vor dem zweiten Fahrzeug (Fixationsobjekt) befindet. Dies erschwert die Detektionsbedingungen für die Versuchspersonen, was auch am geringeren Visibility Level im Vergleich zu den anderen Objektpositionen zu erkennen ist.

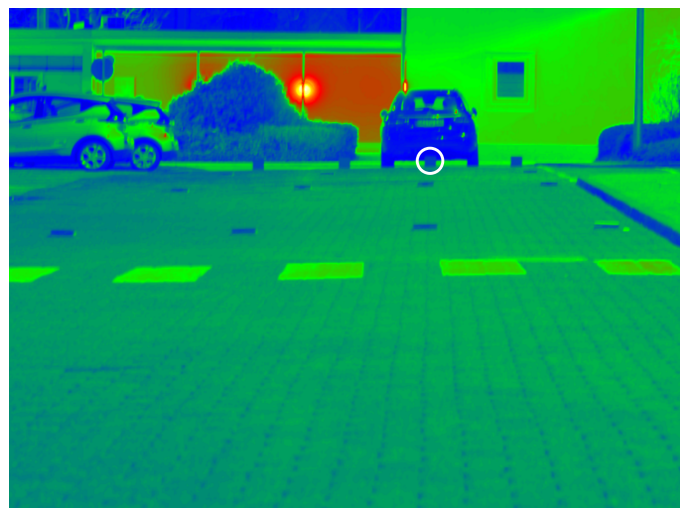


Abbildung 5.17.: Graukarte an Objektposition 15 auf Teststraße 2; die Detektionsbedingungen werden durch die Position der Graukarte direkt vor dem Fixationsobjekt erschwert.

Die Ergebnisse der Detektionsstudie sind somit in der Lage einerseits die ermittelten Trends aus den

photometrischen Daten bezüglich der Abhängigkeit der Abblendlichteffektivität von der vorhandenen Beleuchtungssituation zu validieren und andererseits das Visibility Level als geeignetes Maß für die Prädiktion von Detektionsbedingungen zu bestätigen. Das durch BACELAR et al. [17] und BUYUKKINACI et al. [45] bestimmte Visibility Level von 7 stellt zudem eine Maßzahl dar, welche für die Prädiktion von passablen Detektionsbedingungen im nächtlichen urbanen Straßenverkehr anwendbar ist.

Die Studienergebnisse zeigen außerdem, dass die Detektionsbedingungen bei vorhandenem Negativkontrast bei ausgeschaltetem Abblendlicht auf beleuchteten Straßen in den meisten Fällen besser sind als bei einer Abblendlichtintensität von 100 %, während die Effektivität und damit die Detektionsbedingungen bei einer Erhöhung der Abblendlichtintensität stark von der aktuellen Straßenbeleuchtungssituation abhängen. Somit werden die Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen von ADRIAN [3], AULHORN [14], BACELAR et al. [16, 17], BHAGAVATHULA et al. [22], BULLOUGH und REA [40] und DAMASKY [56] durch die durchgeführte Detektionsstudie bestätigt.

Zuletzt findet eine genauere Betrachtung des Vorfeldbereiches des Fahrzeugs bis 32 m statt, um die Relevanz des Detektionskriteriums für diesen Bereich zu bestimmen. Hierfür werden die Objektpositionen bei den kürzesten Objektentfernungen für die beiden Messraster-Konstellationen betrachtet, welche 30 m für Konstellation 1 und 20 m für Konstellation 2 betragen. Als Detektionswahrscheinlichkeit wird die minimale Detektionswahrscheinlichkeit betrachtet, welche bei den eingestellten Abblendlichtintensitäten für die jeweiligen Objektpositionen auf den drei Teststraßen auftritt. Die Ergebnisse dieser Betrachtung zeigt Tabelle 5.13.

Tabelle 5.13.: Minimale Detektionswahrscheinlichkeiten für die Graukarte im Vorfeldbereich des Fahrzeugs bis 32 m Entfernung

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Teststraße 1		Teststraße 2		Teststraße 3	
	Entfernung in m		Entfernung in m		Entfernung in m	
	20	30	20	30	20	30
-3,00	42,86 %	64,29 %	57,14 %	64,29 %	64,29 %	50,00 %
-1,50	92,86 %	57,14 %	100,00 %	57,14 %	100,00 %	71,43 %
0,00	100,00 %	85,71 %	100,00 %	78,57 %	100,00 %	71,43 %
1,50	92,86 %	71,43 %	78,57 %	42,86 %	74,88	78,57 %

Tabelle 5.13 zeigt, dass lediglich in zwei von insgesamt 24 Fällen die kritische Detektionsschwelle von 50 % mit einer minimalen Detektionswahrscheinlichkeit von 42,86 % unterschritten wird. Gleichzeitig wird in sieben von 24 Fällen die Graukarte mit einer minimalen Wahrscheinlichkeit von mindestens 90 % sicher detektiert. In fünf dieser Fälle beträgt die Detektionswahrscheinlichkeit sogar 100,00 %. Dies bedeutet, dass die Graukarte in diesen Fällen unabhängig von der eingestellten Abblendlichtintensität von allen Versuchspersonen immer detektiert wird. Diese Ergebnisse zeigen, dass das Detektionskriterium im Vorfeldbereich bis 32 m vor dem Fahrzeug im Vergleich zum Helligkeitskriterium, welches in Kapitel 4 untersucht wird, eine eher untergeordnete Rolle spielt. Somit ist die Vorfeldhelligkeit der definierende Parameter für die Auslegung der Vorfeldausleuchtung des Fahrzeugs.

5.3. Fazit zur Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr

Dieser Abschnitt fasst die Untersuchungen zur Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr zusammen, indem die in Unterabschnitt 3.4.3 abgeleiteten Forschungsfragen aufgegriffen und beantwortet werden.

Welches Visibility Level wird für eine sichere Objektdetektion mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90 % benötigt?

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das benötigte Visibility Level für eine sichere Objektdetektion von den Umgebungsbedingungen abhängt. So wird außerhalb geschlossener Ortschaften unter kontrollierten Umgebungsbedingungen im Lichtkanal ein Visibility Level VL von 13,35 benötigt, um die Graukarte mit einem Reflexionsgrad von etwa 4 % auf 90 % der betrachteten Objektpositionen mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % zu detektieren. Dieser Wert ist vergleichbar mit dem Feldfaktor von 12,7, den DAMASKY [56] in seinen Labor- und Feldstudien ermittelt hat.

Auf dem abgesperrten Testgelände außerhalb geschlossener Ortschaften erhöht sich das benötigte Visibility Level für eine sichere Objektdetektion auf 90 % der Objektpositionen auf 25. Dies liegt an den Umgebungsbedingungen, die nicht so streng kontrollierbar sind wie im Lichtkanal und somit komplexere Detektionssituationen erzeugen. Dennoch sorgt das im Lichtkanal bestimmte Visibility Level von 13,35 auf mehr als 70 % der Objektpositionen auf dem abgesperrten Testgelände für eine sichere Detektion der Graukarte.

Die Ermittlung des Visibility Levels für eine sichere Objektdetektion mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % im nächtlichen urbanen Verkehrsraum gestaltet sich im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen als schwierig. Der Grund hierfür liegt in der maximal einstellbaren Abblendlichtintensität. So ist es nicht realisierbar, dass auf allen Objektpositionen der drei Teststraßen durch die Erhöhung der Abblendlichtintensität auf den Maximalwert ausreichend hohe Positivkontraste zu erzeugen. Dadurch ist die Möglichkeit der Datenauswertung mit der vereinfachten psychometrischen Funktion nach LINSCHOTEN et al. [114] nicht für alle betrachteten Konstellationen gegeben. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen jedoch, dass das durch BACELAR et al. [17] und BUYUKKINACI et al. [45] bestimmte Visibility Level von 7 eine Maßzahl darstellt, welche für die Prädiktion von passablen Detektionsbedingungen im nächtlichen urbanen Straßenverkehr anwendbar ist.

Welchen Einfluss hat der Abstand und der Winkel zum Objekt auf das benötigte Visibility Level?

Um die Winkel- und Abstandsabhängigkeit des benötigten Visibility Levels zu bestimmen, sind streng kontrollierbare Bedingungen, wie sie im Lichtkanal vorzufinden sind, notwendig. Die durchgeführte Detektionsstudie im Lichtkanal zeigt, dass das für eine sichere Objektdetektion benötigte Visibility Level VL einen gaußförmigen Verlauf vorweist. Das Maximum des gaußförmigen Verlaufs des Visibility Levels liegt dabei im fovealen Bereich um 0°. Dieser Zusammenhang, welcher durch Studien von DAMASKY [56] und SCHNEIDER [143] ebenfalls gezeigt wird, lässt sich durch die Verteilung der Stäbchen und Zapfen auf der menschlichen Netzhaut erklären. Da der Abstand zum Objekt durch die Bestimmung der Objektgröße in Winkelminuten bereits berücksichtigt wird, ist die Abstandsabhängigkeit bereits im berechneten Visibility Level enthalten. Eine zusätzliche Abstandsabhängigkeit des benötigten Visibility Levels ist aus den Studienergebnissen nicht herauszulesen.

Dadurch, dass im urbanen Verkehrsraum deutlich komplexere Lichtbedingungen aufgrund der vorhandenen Straßenbeleuchtungssysteme und ihrer Strahlungscharakteristik vorherrschen, ist eine eindeutige Bestimmung einer Abstands- oder Winkelabhängigkeit nicht durchführbar.

Wie beeinflusst die Interaktion von ortsfesten Straßenbeleuchtungssystemen und Kfz-Scheinwerfern und der damit einhergehende Übergang vom Negativ- zum Positivkontrast die Objektdetektion im urbanen Verkehrsraum?

Die durchgeführte Untersuchung im nächtlichen urbanen Verkehrsraum zeigt, dass sich die ortsfeste Straßenbeleuchtung und die Kfz-Beleuchtung gegenseitig beeinflussen und damit einen starken Effekt auf die Detektionsbedingungen im nächtlichen urbanen Straßenverkehr haben. So ist auf allen betrachteten Teststraßen durch die vorhandene ortsfeste Straßenbeleuchtung bereits ein Negativkontrast zwischen der Graukarte

und ihrer Umgebung vorhanden, welche eine Detektion ermöglicht. Wird die Abblendlichtintensität erhöht, so wird dieser vorhandene Negativkontrast zunächst reduziert und die Detektionsbedingungen für die Graukarte erschwert. Je nachdem welcher Beleuchtungsklasse die jeweilige Teststraße zuzuordnen ist, wird der Übergangspunkt $K_W = 0$ durch die Erhöhung der Abblendlichtintensität erreicht oder nicht erreicht. An diesem Übergangspunkt ist das Objekt von seiner Umgebung nicht zu unterscheiden. Dieser Übergangspunkt wird in der durchgeführten Untersuchung auf Teststraßen der Beleuchtungsklasse M5 und M6 erreicht und sogar überschritten, sodass eine Objektdetektion durch den nun vorhandenen Positivkontrast realisierbar ist. Wird dieser Übergangspunkt durch die Erhöhung der Abblendlichtintensität nicht erreicht, wie es bei größeren Objektentfernungen auf der Teststraße 1 (Beleuchtungsklasse M4) der Fall ist, so sorgt die Erhöhung der Abblendlichtintensität lediglich für eine Kontrastreduktion und infolgedessen für eine Verschlechterung der Detektionsbedingungen für Fahrzeugführer.

Welche Kontrastpolarität (Positiv- oder Negativkontrast) ist im nächtlichen urbanen Verkehrsraum für die Objektdetektion zu bevorzugen?

Die Betrachtung des Anteils der Objektpositionen, auf denen die Graukarte bei den eingestellten Abblendlichtintensitäten von 0 % und 100 % detektiert wird, zeigt, dass das ausgeschaltete Abblendlicht in allen betrachteten Fällen mindestens so gut für die Objektdetektion geeignet ist wie eine relative Abblendlichtintensität von 100 %. Damit zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Studie, dass der Negativkontrast für die Objektdetektion im nächtlichen urbanen Straßenverkehr bevorzugt zu betrachten ist. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass aufgrund der Komplexität und Variabilität der Beleuchtungssituationen im urbanen Verkehrsraum eine statische Optimierung der Kfz-Frontscheinwerfer nicht zielführend ist.

Hier ist eine kamerabasierte dynamisch adaptive Lichtsteuerung empfehlenswert. Zunächst wird dabei der vorhandene Negativkontrast genutzt, um Objekte im Sichtfeld mit der Kamera zu detektieren und das Visibility Level VL des Objektes zu berechnen. Sobald das Visibility Level unter den Wert von 7 fällt, ist die Intensität der Lichtverteilung in diesem Bereich entsprechend anzupassen, indem beispielsweise die Intensität auf dem Objekt erhöht oder die Intensität des Umfelds reduziert wird. Um eine solche dynamisch adaptive Anpassung zu realisieren, ist ein segmentiertes Fahrlicht erforderlich, welches den Bereich vor dem Fahrzeug ab einer Entfernung von 32 m abdeckt. Ein solches System wäre über leichte Anpassungen bereits vorhandener Scheinwerfertechnologien auf DMD- oder Mikro-LED-Basis (siehe Kapitel 2) realisierbar.

6. Situativ optimierte Frontscheinwerferlichtverteilungen

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus den durchgeführten Studien verwendet, um optimierte Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilungen zu generieren. Hierfür werden Berechnungsvorschriften sowohl für die Fahrbahnelligkeit im Fahrzeugvorfeld bis 32 m als auch den Detektionsbereich ab einer Entfernung von 32 m modelliert. Dabei wird zur vereinfachenden Betrachtung die Annahme getroffen, dass die Lichtverteilungen von einem einzigen Frontscheinwerfer erzeugt werden, welcher sich auf einer Anbauhöhe von 0,75 m in der Mitte der Fahrzeuglängsachse befindet.

6.1. Helligkeitsoptimierte Frontscheinwerferlichtverteilungen

Die Modellierung von optimierten Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilungen beginnt mit der Helligkeitsoptimierung im Fahrzeugvorfeld. Hierzu wird die Gaußfunktion als Basis in Anlehnung an bereits bestehende Frontscheinwerferlichtverteilungen (vgl. Abbildung 2.1, Abbildung 2.2 und Abbildung 2.5) herangezogen um die Fahrbahnleuchtdichte zu beschreiben. Diese wird in ihrer allgemeinen Form, wie in Gleichung 6.1 folgt, betrachtet.

$$f(x) = a \cdot \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{c^2}\right) \quad (6.1)$$

Die Funktionsparameter a , b und c definieren dabei die Eigenschaften der Funktion und sind nachfolgend zu bestimmen. Der Parameter a stellt den Maximalwert dar, welcher durch die Funktion angenommen wird. Durch den Parameter b wird der Erwartungswert beschrieben, an dem der Scheitelpunkt der Funktion erreicht wird und die Funktion den Maximalwert a annimmt. Über den Parameter c wird die Steilheit der Funktion definiert. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine winkelabhängige Fahrbahnleuchtdichteverteilung zu generieren ist, wird die allgemeine Gaußfunktion angepasst (siehe Gleichung 6.2).

$$L(\phi_h) = L_{\text{Max}} \cdot \exp\left(-\frac{(\phi_h - b)^2}{c^2}\right) \quad (6.2)$$

Um eine symmetrische Vorfeldausleuchtung zu erreichen, wird der Scheitelpunkt der Funktion auf die horizontale Winkelposition $\phi_h = 0^\circ$ gelegt. Somit findet keine Verschiebung des Scheitelpunktes statt und der Parameter b wird zu 0 gewählt. Daraus ergibt sich die modifizierte Gleichung 6.3.

$$L(\phi_h) = L_{\text{Max}} \cdot \exp\left(-\frac{\phi_h^2}{c^2}\right) \quad (6.3)$$

Im nächsten Schritt ist der Parameter c zu bestimmen. Hierfür wird als zusätzliche Anforderung die horizontale Gleichmäßigkeit U_h definiert. Diese beschreibt, ähnlich wie die Längsgleichmäßigkeit U_1 , das Verhältnis zwischen der minimalen Fahrbahnleuchtdichte L_{Min} zur maximalen Fahrbahnleuchtdichte L_{Max} in horizontaler Richtung (siehe Gleichung 6.4).

$$U_h = \frac{L_{\text{Min}}}{L_{\text{Max}}} \quad (6.4)$$

Die minimale Fahrbahnleuchtdichte L_{Min} für die Gleichmäßigkeitsbetrachtung wird aufgrund des Verlaufs der Gaußfunktion am horizontalen Grenzwinkel $\phi_{h,G}$ erreicht. Dieser definiert die horizontale Ausdehnung und damit die Breite des Vorfeldbereichs, in welchem die gewünschte Gleichmäßigkeit U_h gefordert wird. Der Grenzwinkel $\phi_{h,G}$ und der äußerste horizontale Winkel der Lichtverteilung $\phi_{h,\text{Max}}$ sind dabei nicht zwangsläufig identisch. So ist es möglich, dass die horizontale Gleichmäßigkeit beispielsweise in einem horizontalen Winkelbereich von $-\phi_{h,G} = -10^\circ$ bis $\phi_{h,G} = 10^\circ$ betrachtet wird und gleichzeitig der horizontale Winkel ϕ_h für die Gesamtlichtverteilung in einem Bereich von $-\phi_{h,\text{Max}} = -45^\circ$ bis $\phi_{h,\text{Max}} = 45^\circ$ liegt. Die Herleitung des Parameters c erfolgt in Gleichung 6.5 bis Gleichung 6.10.

$$L(\phi_{h,G}) = L_{\text{Max}} \cdot \exp\left(-\frac{\phi_{h,G}^2}{c^2}\right) \quad (6.5)$$

$$L_{\text{Min}} = L_{\text{Max}} \cdot \exp\left(-\frac{\phi_{h,G}^2}{c^2}\right) \quad (6.6)$$

$$U_h \cdot L_{\text{Max}} = L_{\text{Max}} \cdot \exp\left(-\frac{\phi_{h,G}^2}{c^2}\right) \quad (6.7)$$

$$U_h = \exp\left(-\frac{\phi_{h,G}^2}{c^2}\right) \quad (6.8)$$

$$\ln(U_h) = -\frac{\phi_{h,G}^2}{c^2} \quad (6.9)$$

$$c^2 = -\frac{\phi_{h,G}^2}{\ln(U_h)} \quad (6.10)$$

Durch Einsetzen in Gleichung 6.3 ergibt sich die in Gleichung 6.11 gezeigte Funktion für die winkelabhängige Fahrbahnleuchtdichte. Diese Funktion ist in der Lage die Gaußfunktion so anzupassen, dass die Fahrbahnleuchtdichte in einem definierten Winkelbereich von $-\phi_{h,G}$ bis $\phi_{h,G}$ eine horizontale Gleichmäßigkeit von U_h aufweist.

$$L(\phi_h) = L_{\text{Max}} \cdot \exp\left(-\frac{\phi_h^2}{\frac{\phi_{h,G}^2}{\ln(U_h)}}\right) \quad (6.11)$$

Abbildung 6.1 zeigt exemplarisch, wie die Gaußfunktion über den Parameter c an die gewünschten horizontalen Gleichmäßigkeiten von 0,3 und 0,7 bei verschiedenen horizontalen Grenzwinkeln von 15° und 30° angepasst wird. Hierfür wird der Parameter L_{Max} zunächst auf einen Wert von 1 cd m^{-2} gesetzt. Die Betrachtung der horizontalen Gleichmäßigkeit erfolgt dabei einerseits für einen horizontalen Grenzwinkel $\phi_{h,G}$ von 15° (blaue Kurven) und andererseits für einen horizontalen Grenzwinkel $\phi_{h,G}$ von 30° . In beiden Fällen wird die Funktion aus Gleichung 6.11 in einem horizontalen Winkelbereich von -30° bis 30° ausgewertet.

Dabei ist in Abbildung 6.1 deutlich der Effekt der Anpassung der Gaußfunktion über den Parameter c zu erkennen. So zeigen die Verläufe der Gaußfunktion bei einem Grenzwinkel $\phi_{h,G}$ von 15° , welche in blau dargestellt sind, dass am gegebenen Grenzwinkel von 15° die Fahrbahnleuchtdichte L einen Wert von $0,3 \text{ cd m}^{-2}$ (durchgezogene Kurve) bzw. $0,7 \text{ cd m}^{-2}$ (gestrichelte Kurve) aufweist und somit sowohl die

definierte horizontale Gleichmäßigkeit U_h von 0,3 als auch von 0,7 eingehalten wird. Ebenfalls zu erkennen ist, dass dies über die Anpassung der Steilheit erfolgt. So weist die Gaußfunktion, welche eine horizontale Gleichmäßigkeit U_h von 0,7 aufzuweisen hat, eine betragsmäßig geringere Steigung auf als diejenige, welche eine horizontale Gleichmäßigkeit U_h von 0,3 aufzuweisen hat.

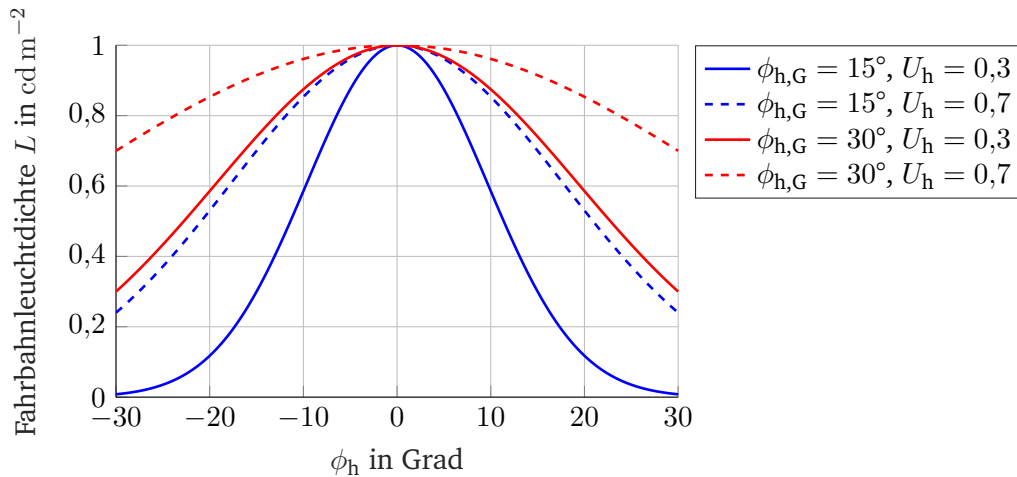


Abbildung 6.1.: Durch das Kriterium der homogenen Gleichmäßigkeit U_h modifizierte Gaußfunktion; durch das Anpassen der Steilheit der Funktion ist eine definierte horizontale Gleichmäßigkeit U_h bei verschiedenen horizontalen Grenzwinkeln erreichbar.

Wird der horizontale Grenzwinkel $\phi_{h,G}$ von 15° auf 30° erhöht, so wird die Gaußfunktion für den sich ergebenden Winkelbereich angepasst, um die geforderten horizontalen Gleichmäßigkeiten U_h von 0,3 (durchgezogene rote Kurve) und 0,7 (gestrichelte rote Kurve) zu erfüllen. Diese Anpassung resultiert in breiteren Kurvenverläufen mit niedrigeren Steigungen.

Um die Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahn vollständig zu beschreiben, wird zuletzt der Parameter L_{Max} , welcher für eine bestimmte durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} zu wählen ist, definiert. Hierzu wird zunächst die Formel für die Berechnung der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} in Gleichung 6.12 betrachtet.

$$L_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n L_{\text{Max}} \cdot \exp \left(- \frac{\phi_{hM,i}^2}{\frac{\phi_{h,G}^2}{\ln(U_h)}} \right) \quad (6.12)$$

Dabei beschreibt n die Anzahl der betrachteten horizontalen Winkel und $\phi_{hM,i}$ den aktuell betrachteten horizontalen Winkel im für die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte relevanten Winkelbereich. Dabei ist es möglich den insgesamt betrachteten horizontalen Winkelbereich und den für die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte betrachteten Winkelbereich unterschiedlich zu wählen. Durch Umstellen der Gleichung 6.12 nach L_{Max} und Einsetzen in Gleichung 6.11 wird die vollständige Funktion zur Bestimmung der winkelabhängigen Fahrbahnleuchtdichte $L(\phi_h)$ bestimmt, welche in Gleichung 6.13 gegeben ist. Zur Bestimmung der benötigten durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} sind die Ergebnisse aus den in Kapitel 4 beschriebenen Untersuchungen heranzuziehen. So wird anhand der Studienergebnisse außerhalb geschlossener Ortschaften eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von 1 cd m^{-2} empfohlen. Im nächtlichen urbanen Verkehrsraum

ergeben sich die durch die Kfz-Beleuchtung zu erzeugenden Fahrbahnleuchtdichten aus der in Abbildung 4.15 gezeigten exponentiellen Korrelation.

$$L(\phi_h) = \frac{L_{avg}}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{\phi_{hM,i}^2}{\frac{\phi_{h,G}^2}{\ln(U_h)}}\right)} \cdot \exp\left(-\frac{\phi_h^2}{\frac{\phi_{h,G}^2}{\ln(U_h)}}\right) \quad (6.13)$$

In Abbildung 6.2 sind vier exemplarische Verläufe für die horizontale Fahrbahnleuchtdichte dargestellt. Dabei wird der horizontale Winkel ϕ_h in einem Bereich von -30° bis 30° variiert, während die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte im Winkelbereich von -15° bis 15° betrachtet wird. Die geforderte horizontale Gleichmäßigkeit von 0,3 bzw. 0,7 wird wie bereits in Abbildung 6.1 an den beiden horizontalen Grenzwinkeln $\phi_{h,G}$ von 15° (blaue Kurven) und 30° ausgewertet.

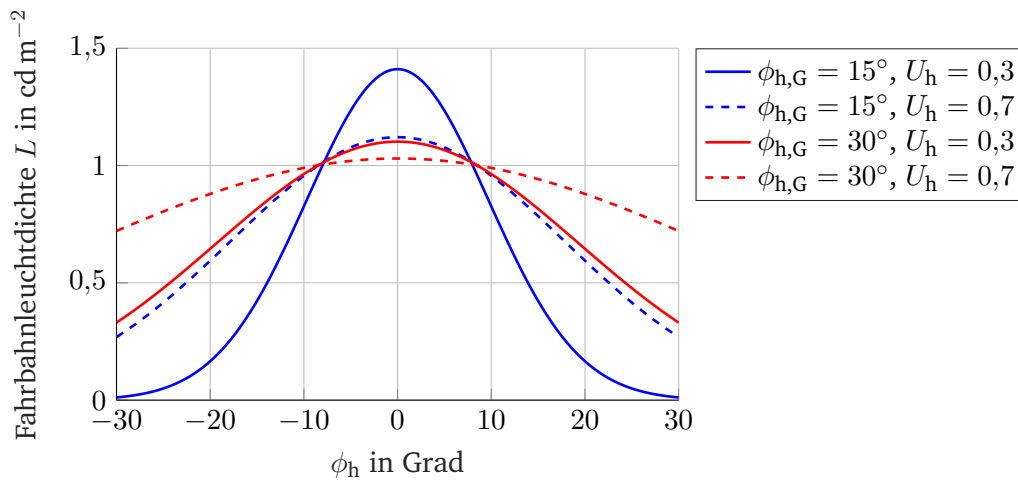


Abbildung 6.2.: Fahrbahnleuchtdichteverläufe mit gleicher durchschnittlicher Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von 1 cd m^{-2} im horizontalen Winkelbereich von -15° bis 15° ; je nach geforderter horizontaler Gleichmäßigkeit und betrachtetem Winkelbereich ergeben sich unterschiedliche Verläufe für die Fahrbahnleuchtdichte, je höher dabei die geforderte Gleichmäßigkeit ist, desto näher liegt die maximale Fahrbahnleuchtdichte L_{Max} an der geforderten durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} .

Alle vier in Abbildung 6.2 dargestellten Leuchtdichteverläufe weisen im Winkelbereich von -15° bis 15° eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von 1 cd m^{-2} auf. Dennoch unterscheiden sich die dargestellten Leuchtdichteverläufe deutlich voneinander. Dies liegt an den unterschiedlichen horizontalen Grenzwinkeln $\phi_{h,G}$ von 15° (blaue Kurven) und 30° (rote Kurven) und den dort geforderten horizontalen Gleichmäßigkeiten U_h von 0,3 (durchgezogene Kurven) und 0,7 (gestrichelte Kurven). Abbildung 6.2 zeigt zudem deutlich, dass mit steigender horizontaler Gleichmäßigkeit U_h die maximale Fahrbahnleuchtdichte L_{Max} sich der geforderten durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} annähert und der Verlauf der Gaußkurve flacher wird. Der gleiche Effekt ist bei höherem horizontalen Grenzwinkel $\phi_{h,G}$ ebenfalls zu beobachten.

Somit ist die in Gleichung 6.13 bestimmte Leuchtdichtefunktion in der Lage unterschiedliche Fahrbahnleuchtdichteverläufe zu beschreiben, welche in bestimmten Teilbereichen die gleichen definierten Eigenschaften bezüglich der horizontalen Gleichmäßigkeit U_h und der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} aufweisen.

Um aus diesen Fahrbahnleuchtdichteverläufen Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilungen zu generieren, ist zunächst die Berechnung der benötigten Beleuchtungsstärke E erforderlich. Hierzu wird in Anlehnung an KÖHLER [107] der mittlere Leuchtdichtekoeffizient q_0 für die Berechnung der radialen Beleuchtungsstärke E_r herangezogen, welcher die Beziehung zwischen der Leuchtdichte L einer Fläche und der zugehörigen Beleuchtungsstärke beschreibt (siehe Gleichung 6.14). Für Leuchtdichtekoeffizienten von Fahrbahnoberflächen sind Standardwerte aus Tabellen der CIE zu entnehmen [55].

$$q_0 = \frac{L}{E_r} \quad (6.14)$$

Durch Umstellen von Gleichung 6.14 wird aus dem horizontalen Leuchtdichteverlauf $L(\phi_h)$ der horizontale Verlauf der radialen Beleuchtungsstärke $E_r(\phi_h)$ mit Gleichung 6.15 berechnet.

$$E_r(\phi_h) = \frac{L(\phi_h)}{q_0} \quad (6.15)$$

Anschließend wird aus dem horizontalen Beleuchtungsstärkeverlauf die Lichtstärke berechnet, welche durch einen Kfz-Frontscheinwerfer zu erzeugen ist, um die gewünschte Leuchtdichteverteilung auf der Fahrbahn zu erreichen. Die erforderliche Lichtstärke ist dabei sowohl vom horizontalen Winkel ϕ_h als auch vom vertikalen Winkel ϕ_v abhängig und wird über das photometrische Entfernungsgesetz berechnet, welches aufgrund der Verwendung der radialen Beleuchtungsstärke vereinfacht wird, da keine Cosinuskorrektur erfolgt [107] (siehe Gleichung 6.16).

$$I(\phi_h, \phi_v) = E_r(\phi_h) \cdot d(\phi_h, \phi_v, h)^2 \quad (6.16)$$

Dabei stellt d den Abstand vom Scheinwerfer zum aktuellen Fahrbahnpunkt dar, welcher von den beiden Winkeln ϕ_h , ϕ_v und der Scheinwerferanbauhöhe h abhängt. Durch das beschriebene Berechnungsmodell sind unterschiedliche Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilungen generierbar, welche anhand verschiedener die Fahrbahnhelligkeit betreffender Kriterien modifizierbar und optimierbar sind. Solch eine Lichtverteilungsgenerierung wird nachfolgend mit den in Tabelle 6.1 gewählten Parametern durchgeführt.

Tabelle 6.1.: Gewählte Parameter für die Generierung einer helligkeitsoptimierten Frontscheinwerferlichtverteilung

Parameter	Symbol	Wert bzw. Wertebereich
Scheinwerferanbauhöhe	h	0,75 m
Horizontaler Winkel	ϕ_h	-30,00° bis 30,00°
Vertikaler Winkel	ϕ_v	-15,00° bis -1,30°
Durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte	L_{avg}	1,00 cd m ⁻²
Winkelbereich für L_{avg}	$\phi_{hM,i}$	-10,00° bis 10,00°
Horizontale Gleichmäßigkeit	U_h	0,30 und 0,70
Horizontaler Grenzwinkel	$\phi_{h,G}$	5,50°
Leuchtdichtekoeffizient	q_0	0,07 cd m ⁻² lx ⁻¹

Die Auswahl der in Parameter in Tabelle 6.1 erfolgt durch die Annahme folgender Rahmenbedingungen. Die Scheinwerferanbauhöhe h von 0,75 m stellt einen typischen Wert für aktuelle Personenkraftwagen (PKW) dar. Der horizontale Winkelbereich von -30° bis 30° wird gewählt, um den Einfluss unterschiedlicher Anforderungen bezüglich Gleichmäßigkeit und durchschnittlicher Fahrbahnleuchtdichte auf die horizontale Lichtstärkeverteilung zu beobachten. Der vertikale Winkelbereich von -15° bis $-1,3^\circ$ wird gewählt, da dieser den in Kapitel 4 ermittelten relevanten Vorfeldbereich bis 32 m vor dem Fahrzeug abdeckt. Die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von $1,00 \text{ cd m}^{-2}$ ist die in Kapitel 4 bestimmte Fahrbahnleuchtdichte, welche für den Übergang vom Sicherheits- in den Komfortbereich der Helligkeitswahrnehmung außerhalb geschlossener Ortschaften erforderlich ist. Der für die durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} betrachtete horizontale Winkelbereich von $-10,00^\circ$ bis $10,00^\circ$ wird verwendet, um sowohl die eigene Fahrspur als auch zum großen Teil die beiden benachbarten Fahrspuren auszuleuchten und somit eine entsprechende Ausleuchtungsbreite zu bieten. Bei der Auswahl der Werte für die horizontale Gleichmäßigkeit U_h dienen die Werte für die Längs- und Gesamtgleichmäßigkeit aus der EN 13201 [61–65] als Orientierung. Der horizontale Grenzwinkel $\phi_{h,G}$ wird zu $5,50^\circ$ gewählt, um für die Betrachtung der Gleichmäßigkeit die eigene Fahrspur und zum Teil die beiden benachbarten Fahrspuren als relevanten Bereich zu nutzen. Der Wert für den Leuchtdichtekoeffizienten q_0 wird aus den CIE-Tabellen für Asphalt als Fahrbahnbelag entnommen [55].

In Abbildung 6.3 sind die Lichtstärkeverteilungen dargestellt, welche exemplarisch mit dem beschriebenen Modell und den Parametern aus Tabelle 6.1 generiert werden. Dabei ist oben die Lichtverteilung dargestellt, welche im horizontalen Winkelbereich von $-5,50^\circ$ bis $5,50^\circ$ eine Gleichmäßigkeit U_h von 0,30 aufweist und unten die Lichtverteilung mit einer horizontalen Gleichmäßigkeit U_h von 0,70 im gleichen Winkelbereich.

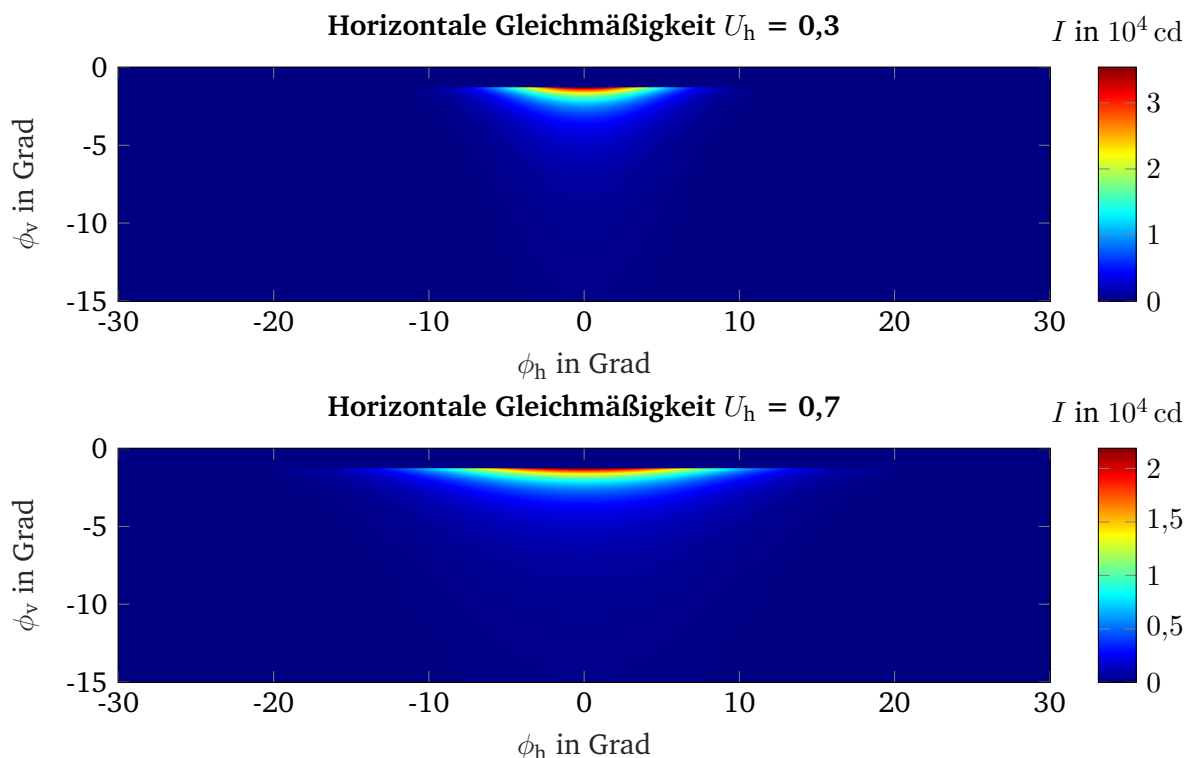


Abbildung 6.3.: Exemplarisch generierte helligkeitsoptimierte Lichtverteilungen; die Bedingung einer höheren horizontalen Gleichmäßigkeit U_h führt zu einer breiteren Lichtstärkeverteilung und gleichzeitig zu einer geringeren Maximallichtstärke I_{Max} .

Abbildung 6.3 zeigt, dass sich die Veränderungen der Fahrbahnleuchtdichteverläufe aus Abbildung 6.2 aufgrund der unterschiedlichen horizontalen Gleichmäßigkeiten U_h in den Lichtstärkeverteilungen widerspiegeln. So weist die generierte Lichtstärkeverteilung mit einer horizontalen Gleichmäßigkeit U_h von 0,3 eine Breite von etwa $\pm 8^\circ$ auf (siehe Abbildung 6.3 oben), während die Lichtstärkeverteilung bei sonst gleichen Rahmenbedingungen aufgrund der höheren horizontalen Gleichmäßigkeit U_h von 0,7 mit etwa $\pm 15^\circ$ deutlich breiter ist (siehe Abbildung 6.3 unten). Die Auswirkungen der horizontalen Gleichmäßigkeit auf den Maximalwert sind in den generierten Lichtstärkeverteilungen ebenfalls wiederzufinden. So ist die maximale Lichtstärke I_{Max} bei einer geforderten horizontalen Gleichmäßigkeit U_h von 0,7 mit etwa 21.883 cd deutlich geringer als die maximale Lichtstärke I_{Max} von etwa 35.398 cd bei einer Gleichmäßigkeit U_h von 0,3.

6.2. Detektionsoptimierte Frontscheinwerferlichtverteilungen

Für eine detektionsbasierte Lichtverteilungsoptimierung stellt das in Gleichung 3.6 definierte Visibility Level VL den Ausgangspunkt dar. Dieses gibt das Verhältnis der aktuell herrschenden Leuchtdichtedifferenz ΔL zur Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} an.

$$VL = \frac{\Delta L}{\Delta L_{\text{th}}} = \frac{L_{\text{O}} - L_{\text{U}}}{\Delta L_{\text{th}}}$$

Die Berechnung der Schwellenleuchtdichtedifferenz ΔL_{th} erfolgt dabei mit dem in Gleichung 3.5 gezeigten STV Modell nach ADRIAN [3] unter Verwendung der dafür benötigten Parameter.

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

Aus den gezeigten Beziehungen wird im nächsten Schritt die für das Erreichen des benötigten winkelabhängigen Visibility Levels $VL(\phi_h)$ benötigte Leuchtdichtedifferenz $\Delta L(\phi_h)$, welche die Differenz zwischen der Objektleuchtdichte $L_{\text{O}}(\phi_h)$ und der Umfeldleuchtdichte $L_{\text{U}}(\phi_h)$ beschreibt, berechnet (siehe Gleichung 6.17). Im Anschluss wird mit Gleichung 6.19 die Objektleuchtdichte $L_{\text{O}}(\phi_h)$ berechnet, die das Objekt aufzuweisen hat, um sicher detektiert zu werden.

$$\Delta L(\phi_h) = VL(\phi_h) \cdot \Delta L_{\text{th}} \quad (6.17)$$

$$L_{\text{O}}(\phi_h) - L_{\text{U}}(\phi_h) = VL(\phi_h) \cdot \Delta L_{\text{th}} \quad (6.18)$$

$$L_{\text{O}}(\phi_h) = VL(\phi_h) \cdot \Delta L_{\text{th}} + L_{\text{U}}(\phi_h) \quad (6.19)$$

Unter Annahme eines diffus reflektierenden Objekts wird aus der Objektleuchtdichte $L_{\text{O}}(\phi_h)$ und dem Reflexionsgrad des Objekts ρ die durch den Scheinwerfer auf dem Objekt zu erzeugende Beleuchtungsstärke $E_{\text{O}}(\phi_h)$ durch Gleichung 6.20 berechnet.

$$E_{\text{O}}(\phi_h) = \frac{L_{\text{O}}(\phi_h) \cdot \pi}{\rho} \quad (6.20)$$

Über das photometrische Entfernungsgesetz in Gleichung 6.21 wird im letzten Schritt die durch die Kfz-Frontscheinwerfer zu emittierende Lichtstärke berechnet.

$$I(\phi_h, \phi_v) = E_{\text{O}}(\phi_h) \cdot d(\phi_h, \phi_v, h)^2 \cdot \cos(\varepsilon) \quad (6.21)$$

Die Berechnung der benötigten Lichtstärke $I(\phi_h, \phi_v)$ hängt somit stark vom benötigten Visibility Level VL, welches der gesamten Betrachtung zugrunde gelegt wird, ab. Für die Wahl des benötigten Visibility Levels

werden dabei zwei unterschiedliche Fälle betrachtet. Einerseits wird der gaußförmige Verlauf aus den durchgeführten Untersuchungen (siehe Abbildung 5.6) betrachtet und andererseits eine winkelunabhängige Wahl des Visibility Levels von 13,35 vorgenommen, welches für eine sichere Objektdetektion auf mindestens 90 % der betrachteten Objektpositionen im Lichtkanal erforderlich ist. Abbildung 6.4 zeigt die beiden resultierenden Verläufe des Visibility Levels.

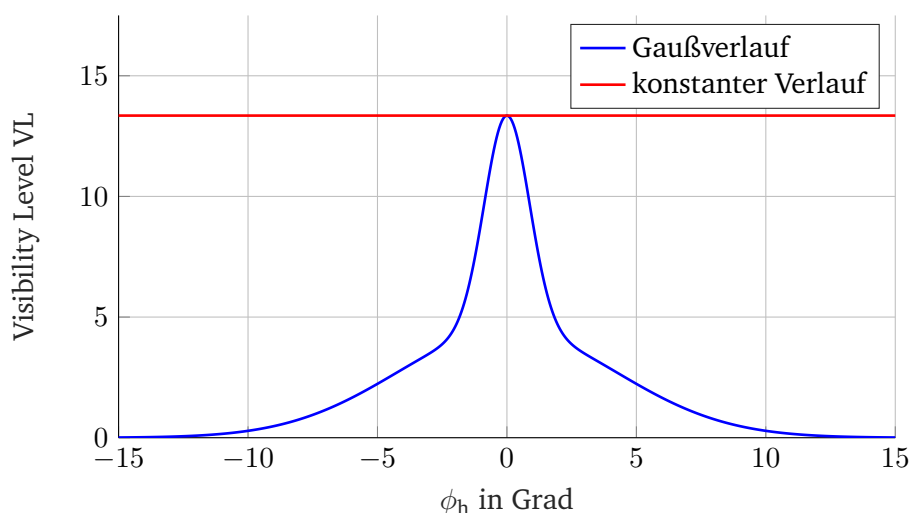


Abbildung 6.4.: Anwendbare Visibility Level Verläufe für die detektionsbasierte Optimierung von Frontscheinwerferlichtverteilungen; einerseits ist für die Optimierung die in den durchgeführten Studien ermittelte Gaußfunktion als Basis nutzbar, andererseits führt die Verwendung eines konstanten Verlaufs dazu, dass im peripheren Winkelbereich das benötigte Visibility Level VL ebenfalls erreicht und sogar überschritten wird.

Abbildung 6.4 zeigt, dass durch die Wahl eines über den horizontalen Winkelbereich konstanten Visibility Levels (in Abbildung 6.4 rot dargestellt) der gesamte Winkelbereich mit einem ausreichend hohen Visibility Level versehen ist, um eine sichere Objektdetektion zu ermöglichen. Wird im Gegensatz dazu der gaußförmige Verlauf genutzt, so wird in den unterschiedlichen Winkelbereichen das Visibility Level so groß gewählt, dass es den für den Winkelbereich erforderlichen Detektionsbedingungen gerade genügt. Da im Grundkonzept (siehe Abbildung 3.23) ein segmentiertes Fahrlicht vorgesehen ist, dessen Segmente sowohl einzeln ein- und ausschaltbar als auch dimmbar sind, wird für die weitere Betrachtung ein über den horizontalen Bereich konstantes Visibility Level gewählt. Somit vereinfacht sich die Berechnung der Lichtstärke zu der in Gleichung 6.22 gegebenen Formel. Hierbei wird die Lichtstärke bei einem horizontalen Winkel ϕ_h von 0° bestimmt und für alle weiteren horizontalen Winkel übernommen.

$$I(\phi_h, \phi_v) = I(0^\circ, \phi_v) = E_O(0^\circ) \cdot d(0^\circ, \phi_v, h)^2 \cdot \cos(\varepsilon) \quad (6.22)$$

Im nächsten Schritt wird exemplarisch eine detektionsbasiert optimierte Lichtverteilung mit den in Tabelle 6.2 gewählten Parametern generiert. Diese Modellierung ist ebenfalls für die kamerabasierte volladaptive Optimierung von Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilungen im nächtlichen urbanen Verkehrsraum verwendbar. Voraussetzung hierfür ist die Berechnung des orts aufgelösten Visibility Levels aus Kameraaufnahmen.

Tabelle 6.2.: Gewählte Parameter für die Generierung einer detektionsoptimierten Frontscheinwerferlichtverteilung

Parameter	Symbol	Wert bzw. Wertebereich
Visibility Level	VL	13,35
Scheinwerferanbauhöhe	h	0,75 m
Horizontaler Winkel	ϕ_h	$-15,00^\circ$ bis $15,00^\circ$
Vertikaler Winkel	ϕ_v	$-1,30^\circ$ bis $-0,30^\circ$
Beobachtungsdauer	t	350 ms
Umfeldleuchtdichte	L_U	$0,28 \text{ cd m}^{-2}$
Wahrscheinlichkeitsfaktor	k	2,6
Reflexionsgrad des Objekts	ρ	0,2
Relevante Objektausdehnung	h_O	1,00 m
Kontrastpolaritätsfaktor	F_{CP}	1
Beobachteralter	Age	30 Jahre
Objektabstand	d	33 m bis 145 m

Das geforderte Visibility Level VL von 13,35 ergibt sich aus den Ergebnissen der Untersuchungen im Lichtkanal. Der horizontale Winkel ϕ_h wird in einem Bereich von $-15,00^\circ$ bis $15,00^\circ$ gewählt, da dies die maximale horizontale Ausdehnung der Objektverteilung im Straßenverkehr nach KOBBERT darstellt [105]. Der vertikale Winkelbereich ergibt sich aus der Scheinwerferanbauhöhe von 0,75 m und dem Objektabstand von etwa 33 m bis 145 m. Dieser Abstandsbereich wird gewählt, da die durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, dass der Bereich im Fahrzeugvorfeld bis 32 m vor dem Fahrzeug durch die Helligkeitswahrnehmung dominiert wird. Die Beobachtungsdauer wird nach NARISADA und YOSHIKAWA [120] gewählt, welche eine Beobachtungsdauer von 350 ms als Standard-Beobachtungsdauer im Straßenverkehr bestimmen. Die Umfeldleuchtdichte L_U von $0,28 \text{ cd m}^{-2}$ wird über den Leuchtdichtekoeffizienten q_0 von $0,07 \text{ cd m}^{-2} \text{ lx}^{-1}$ und den Minimalwert für die Lichtstärke im Punkt 50 V abgeschätzt (10.100 cd m^{-2}) [161]. Für den Wahrscheinlichkeitsfaktor k wird der Standardwert 2,6 und als Reflexionsgrad $\rho = 0,2$ gewählt. Um ein realitätsnahes Detektionsobjekt zu betrachten, wird eine relevante Objektausdehnung h_O von 1,00 m angenommen, welche der Größe eines Kleinkinds bzw. der Hüfthöhe eines Erwachsenen entspricht. Da für die Verkehrssituation außerhalb geschlossener Ortschaften lediglich der Positivkontrast für die Objektdetektion relevant ist, wird der Kontrastpolaritätsfaktor zu 1 gewählt. Das angenommene Beobachteralter von 30 Jahren lässt sich aus dem Versuchspersonenkollektiv abschätzen, welches an den Untersuchungen teilgenommen hat.

Abbildung 6.5 zeigt die Berechnung der benötigten Lichtstärke für Objektabstände von etwa 33 m bis etwa 145 m. Dabei ist die quadratische Abhängigkeit innerhalb des photometrischen Entfernungsgesetzes deutlich zu erkennen. Zusätzlich zu dem Lichtstärkeverlauf sind der Mindestwert für den Messpunkt 75 R (Abblendlicht) und die Mindest- und Maximalwerte für das Fernlicht im Graphen markiert. Der Mindestwert im Punkt 75 R beträgt 12.500 cd , während der Mindestwert für das Fernlicht bei 40.000 cd und der Maximalwert bei 215.000 cd liegt [161]. Da die durchgeführte Betrachtung im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand eines Scheinwerfers mit einer angenommenen Scheinwerferposition mittig auf der Fahrzeuglängsachse erfolgt, werden die Regelungswerte, welche sich auf jeweils den linken und rechten Scheinwerfer beziehen, verdoppelt. Die Ergebnisse der Lichtstärkenberechnung zeigen, dass vor allem in Abständen von 80 m bis 135 m die für die sichere Objektdetektion mit einem geforderten Visibility Level von 13,35 notwendigen Lichtstärken im durch die Regelung zulässigen Bereich für das Fernlicht liegen.

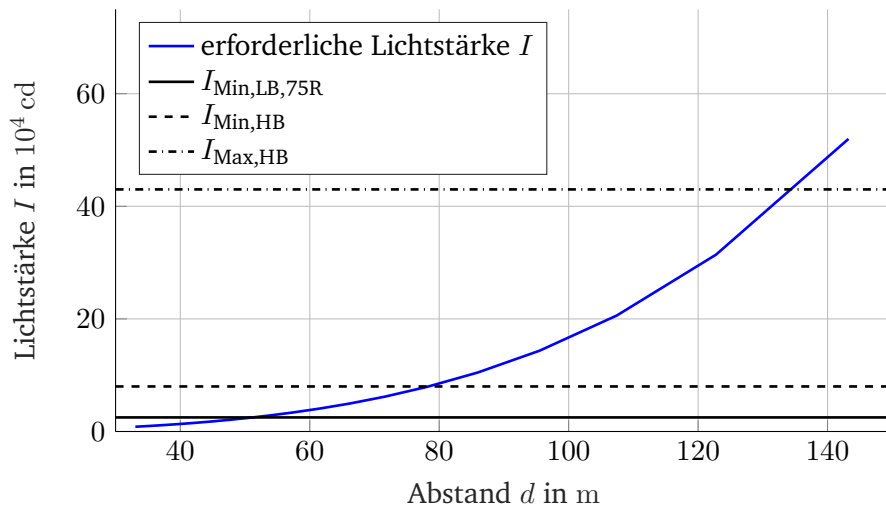


Abbildung 6.5.: Abhängigkeit der erforderlichen Lichtstärke vom Objektstand; mit der maximal erlaubten Lichtstärke im Fernlicht sind Detektionsentfernungen von bis zu 135 m realisierbar.

Abbildung 6.5 zeigt, wie bereits Abbildung 6.4, dass die Wahl der bei größeren Entfernungen erforderlichen Lichtstärke I für die gesamte Lichtstärkeverteilung dazu führt, dass die erforderlichen Lichtstärken in geringeren Entfernungen ebenfalls zuverlässig erreicht werden und damit eine sichere Objektdetektion gewährleistet ist.

Zuletzt werden die beiden generierten Lichtstärkeverteilungen zu einer situativ adaptiven Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilung kombiniert. Die kombinierte Lichtstärkeverteilung ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Dabei wird das segmentierte Fahrlicht bis zu einem vertikalen Winkel von etwa $1,7^\circ$ erweitert, um den Fernlichtbereich ebenfalls abzudecken. Die Segmente weisen eine Größe von $0,5^\circ \cdot 0,5^\circ$ auf. Aufgrund der großen Lichtstärkeunterschiede innerhalb der Lichtstärkeverteilungskurve wird die Falschfarbendarstellung logarithmisch skaliert.

Die anhand der beiden Optimierungsparameter Fahrbahnhelligkeit und Objektdetektion generierte Gesamtlichtverteilung ist einerseits in der Lage, ein adäquates subjektives Sicherheitsgefühl bei Fahrzeugführern hervorzurufen, indem im Fahrzeugvorfeld bis 32 m Entfernung eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte von 1 cd m^{-2} erzeugt wird. Zusätzlich wird eine horizontale Gleichmäßigkeit U_h von 0,7 gewährleistet, was für das Komfortempfinden der Fahrzeugführer förderlich ist.

Andererseits wird über das segmentierte Fahrlicht ab Entfernungen von 32 m bis Entfernungen von etwa 145 m eine sichere Objektdetektion mit einem Visibility Level VL von 13,35 und somit einer Detektionswahrscheinlichkeit von mindestens 90 % gewährleistet. Dies wird dadurch erreicht, dass alle Segmente die gleiche Lichtstärke I von etwa 520.000 cd aufweisen. Das auf diese Weise generierte segmentierte Fahrlicht bietet den Vorteil, dass jedes Segment nach Bedarf gedimmt werden kann und bei voller Intensität die Anforderungen für eine sichere Objektdetektion erfüllen.

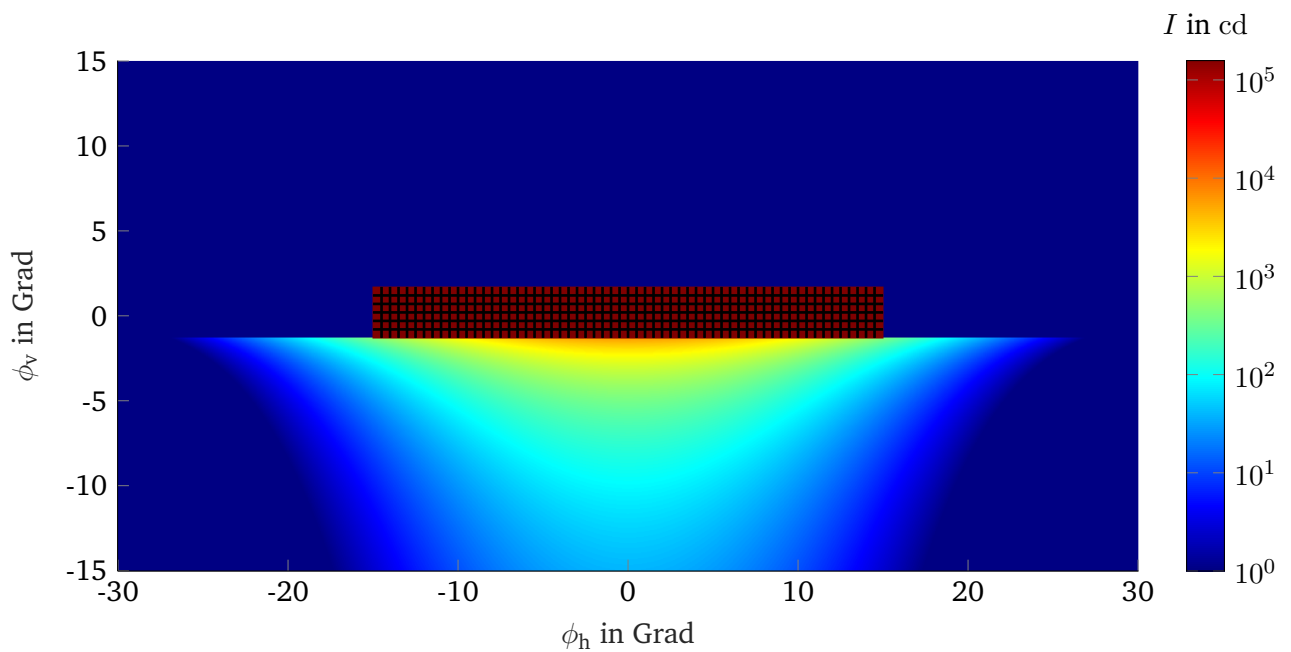


Abbildung 6.6.: Exemplarische situativ adaptive Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilung; die anhand der durchgeführten Studienergebnisse generierte Gesamtlichtverteilung erzeugt eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte von 1 cd m^{-2} im Fahrzeugvorfeld und eine sichere Objektdetektion bis zu einer Entfernung von etwa 145 m.

Die in Abbildung 6.6 dargestellte Lichtverteilung eignet sich zudem dazu, eine kamerabasierte dynamische Lichtverteilungsoptimierung durchzuführen. Hierzu ist lediglich eine Kalibrierung der Kamera und der Scheinwerfer notwendig. Zusätzlich ist ein Algorithmus erforderlich, welcher orts aufgelöst das aktuelle Visibility Level VL berechnet und die Scheinwerfer entsprechend ansteuert.

7. Fazit und Ausblick

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Studien und ihre Ergebnisse kritisch rekapituliert, Erweiterungsvorschläge abgeleitet und Anreize für weiterführende Untersuchungen gegeben. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung adaptiver Kfz-Frontscheinwerferlichtverteilungen anhand wahrnehmungsphysiologischer Kriterien. Als Kriterien dienen dabei einerseits die Fahrbahnelligkeit im Fahrzeugvorfeld und andererseits die Objektdetektion im nächtlichen Straßenverkehr innerhalb und außerhalb geschlossener Ortschaften. Somit wird die Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr sowohl objektiv durch die Objektdetektion als auch subjektiv über die Helligkeitswahrnehmung betrachtet.

Auf Basis des Stands der Technik und Forschung wird hierfür zunächst ein Grundkonzept für situativ adaptive Lichtverteilungen abgeleitet, welches aus einem Grundlicht für die Vorfeldausleuchtung und einem segmentierten Fahrlicht für die Bereitstellung der Detektionsbedingungen besteht. Um diese beiden Lichtverteilungskomponenten zu definieren, werden zusätzlich Forschungsfragen aus dem aktuellen Stand der Forschung abgeleitet und in insgesamt vier Feldstudien beantwortet.

Für die Auslegung des Grundlichts im Fahrzeugvorfeld sind dabei folgende Forschungsfragen zu beantworten.

1. Welcher Bereich im Fahrzeugvorfeld ist für die Helligkeitsbewertung von Fahrzeugführern relevant?
2. Hat die Fahrgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Helligkeitswahrnehmung von Fahrzeugführern?
3. Welche Mindestfahrbahnleuchtdichte ist im non-urbanen Verkehrsraum notwendig, um ein adäquates Sicherheitsgefühl bei Fahrzeugführern hervorzurufen?
4. Welche Mindestfahrbahnleuchtdichte ist im urbanen Verkehrsraum notwendig, um ein adäquates Sicherheitsgefühl bei Fahrzeugführern hervorzurufen?
5. Welchen Einfluss hat das durch die ortsfeste Straßenbeleuchtung erzeugte Leuchtdichteniveau auf die notwendige Fahrbahnleuchtdichte?

Die Beantwortung dieser Forschungsfragen erfolgt über zwei Feldstudien, von denen eine auf einem abgesperrten Testgelände außerhalb geschlossener Ortschaften stattfindet und eine auf drei unterschiedlich beleuchteten Teststraßen im urbanen Verkehrsraum. Der Untersuchungsgegenstand der Feldstudie außerhalb geschlossener Ortschaften ist die Helligkeitswahrnehmung von Fahrzeugführern in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und die Bestimmung des relevanten Vorfeldbereichs für die Helligkeitsbewertung. Hierfür wird im statischen Fall das Fahrzeugvorfeld in drei Bereiche eingeteilt. Der erste Bereich reicht dabei bis zu einer Entfernung von 20 m. Der zweite Bereich erstreckt sich von 20 m bis 32 m und ab einer Entfernung von 32 m handelt es sich um den dritten Bereich im Fahrzeugvorfeld. Die Versuchspersonen bewerten die Relevanz der einzelnen Vorfeldbereiche von „1 - Sehr wichtig“ bis „5 - Überhaupt nicht wichtig“.

Die Helligkeitsbewertung des Fahrzeugvorfelds erfolgt bei verschiedenen durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} , welche über eine PWM-Ansteuerung der Abblendlichtfunktion der LED-Scheinwerfer des verwendeten Testfahrzeugs eingestellt wird, und Fahrgeschwindigkeiten von 0 km h^{-1} (statisch), 30 km h^{-1} und

60 km h⁻¹ auf einer Skala von „1 - Sehr dunkel“ bis „5 - Sehr hell“.

Die Ergebnisse der durchgeführten Studie zeigen, dass das Fahrzeugvorfeld bis 32 m für die Helligkeitsbewertung relevant ist. Außerdem ist ein Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Helligkeitsbewertung der Versuchspersonen zu beobachten. So wird die gleiche durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte mit steigender Fahrgeschwindigkeit dunkler wahrgenommen. Dies bedeutet, dass die Aufgabe der Frontscheinwerfer bei größeren Fahrgeschwindigkeiten darin besteht, höhere Fahrbahnleuchtdichten auf der Straße zu erzeugen, damit der gleiche subjektive Helligkeitseindruck bei Fahrzeugführern entsteht. Weitere Ergebnisse der durchgeführten Studie sind die benötigten Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} für ein adäquates subjektives Sicherheitsgefühl der Fahrzeugführer, welche im statischen Fall bei 0,269 cd m⁻² und in den dynamischen Fällen bei 0,413 cd m⁻² liegt. Um über den absoluten Sicherheitsbereich hinaus in den Komfortbereich überzugehen, wird im statischen Fall eine Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} von 1,0 cd m⁻² benötigt. Dieses Ergebnis bestätigt die von KLEINKES [103] empfohlene Fahrbahnleuchtdichte. Eine Geschwindigkeitserhöhung sorgt hier ebenfalls für höhere benötigte Fahrbahnleuchtdichten L_{avg} von 1,4 cd m⁻² bei 30 km h⁻¹ und 2,0 cd m⁻² bei 60 km h⁻¹.

Im Gegensatz zur Feldstudie außerhalb geschlossener Ortschaften wird die Feldstudie im urbanen Raum rein statisch auf drei unterschiedlich beleuchteten Teststraßen mit dem gleichen Testfahrzeug durchgeführt. Des Weiteren werden die Versuchspersonen gebeten ihr subjektives Sicherheitsgefühl auf einer Nominalskala mit den beiden Werten „Ja, ich fühle mich ausreichend sicher“ und „Nein, ich fühle mich nicht ausreichend sicher“ zu bewerten.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Helligkeitswahrnehmung und das damit verbundene Sicherheitsgefühl exponentiell mit dem Leuchtdichteniveau $L_{avg,0}$ der Straße steigt. Dieses Leuchtdichteniveau wird durch die Straßenbeleuchtung allein erzeugt und stellt die Adaptationsbedingungen her. Der exponentielle Anstieg der benötigten Fahrbahnleuchtdichte mit dem ansteigenden Leuchtdichteniveau ist durch das Weber-Fechner Gesetz [70, 179] zu erklären. Dieses beschreibt die Wahrnehmungsvorgänge als logarithmischen Zusammenhang und besagt, dass bei höheren Adaptationsleuchtdichten höhere Leuchtdichtedifferenzen ΔL erforderlich sind, um die gleiche subjektive Wahrnehmung hervorzurufen.

Somit zeigen die Ergebnisse der Helligkeitsstudien insgesamt, dass eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte L_{avg} ab etwa 1,0 cd m⁻² für ein adäquates Sicherheitsgefühl der Fahrzeugführer sowohl innerhalb als auch außerhalb geschlossener Ortschaften geeignet ist. Dabei ist im urbanen Verkehrsraum in Abhängigkeit der vorhandenen Straßenbeleuchtung eine Reduktion der durchschnittlichen Fahrbahnleuchtdichte möglich, welche durch die Kfz-Frontscheinwerfer bereitzustellen ist.

Neben der Auslegung des Grundlichts werden folgende Forschungsfragen für die Auslegung des segmentierten Fahrlichts beantwortet.

1. Welches Visibility Level wird für eine sichere Objektdetektion mit einer Wahrscheinlichkeit von über 90 % benötigt?
2. Welchen Einfluss hat der Abstand und der Winkel zum Objekt auf das benötigte Visibility Level?
3. Wie beeinflusst die Interaktion von ortsfesten Straßenbeleuchtungssystemen und Kfz-Scheinwerfern und der damit einhergehende Übergang vom Negativ- zum Positivkontrast die Objektdetektion im urbanen Verkehrsraum?
4. Welche Kontrastpolarität (Positiv- oder Negativkontrast) ist im nächtlichen urbanen Verkehrsraum für die Objektdetektion zu bevorzugen?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen werden Detektionsstudien außerhalb und innerhalb geschlossener Ortschaften durchgeführt. Während die Detektionsstudien außerhalb geschlossener Ortschaften in einem Lichtkanal und auf einem abgesperrten Testgelände stattfinden, werden innerhalb geschlossener Ortschaften drei für den öffentlichen Verkehr gesperrte Teststraßen, welche den Beleuchtungsklassen M4 bis M6 zuzuordnen sind, als Testgelände verwendet. Als Detektionsobjekte dienen Graukarten mit einem Reflexionsgrad ρ von etwa 4 %, welche in einem Messraster vor dem Fahrzeugvorfeld positioniert werden, um die Objektdetektion in Abhängigkeit des Abstands und des Winkels zu bestimmen. Somit ergeben sich innerhalb geschlossener Ortschaften Objektentfernungen von 20 m bis 65 m. Außerhalb geschlossener Ortschaften werden Objektentfernungen von 40 m bis 100 m betrachtet. Daher wird bei den Detektionsstudien außerhalb geschlossener Ortschaften sowohl die Abblendlicht- als auch die Fernlichtintensität variiert, während im urbanen Verkehrsraum lediglich das Abblendlicht variiert wird. Die Versuchspersonen haben bei allen Studien die Aufgabe die Objektdetektion zu signalisieren.

Die Ergebnisse der Studie im Lichtkanal zeigen, dass für eine Detektionswahrscheinlichkeit von 90 % ein Visibility Level VL von 13,35 benötigt wird. Dieser Wert ist vergleichbar mit dem von DAMASKY [56] bestimmten Feldfaktor von 12,7. Wird die realitätsnähere Situation auf dem abgesperrten Testgelände betrachtet, so steigt das erforderliche Visibility Level auf 25. Des Weiteren ist im Lichtkanal die Winkelabhängigkeit des erforderlichen Visibility Levels zu beobachten. Diese folgt einem gaußförmigen Verlauf und weist das maximal notwendige Visibility Level im fovealen Bereich (0°) auf. Dieser Verlauf wird durch Untersuchungen von DAMASKY [56] und SCHNEIDER [143] ebenfalls bestätigt.

Da bei den Detektionsstudien der einstellbare Bereich für die Abblendlichtintensität nicht genügt, um ausreichend hohe Visibility Level mit einem Positivkontrast zu erreichen, wird ein Visibility Level von 7 als für eine passable Detektion erforderliches Visibility Level betrachtet. Dieser Wert resultiert aus Studien von BACELAR et al. [16, 17] und BUYUKKINACI et al. [45]. Die Ergebnisse der Detektionsuntersuchungen im urbanen Verkehrsraum zeigen, dass der durch die vorhandene Straßenbeleuchtung erzeugte Negativkontrast auf den drei betrachteten Teststraßen dem Positivkontrast bezüglich der erzeugten Detektionsbedingungen überlegen ist und somit primär für die Optimierung von Frontscheinwerferlichtverteilungen zu betrachten ist. Da jedoch die Beleuchtungssituation aufgrund verschiedener Umgebungsbedingungen und Straßenbeleuchtungssysteme sehr vielfältig und komplex ist, ist eine statisch optimierte Lichtverteilung nicht empfehlenswert. Eine kamerabasierte volladaptive Lichtverteilungsregelung ist für die Verwendung im nächtlichen urbanen Verkehrsraum besser geeignet.

Aus den Studienergebnissen werden im nächsten Schritt Berechnungsvorschriften für Frontscheinwerferlichtverteilungen hergeleitet, welche auf die erforderliche Fahrbahnleuchtdichte und die Gewährleistung geeigneter Detektionsbedingungen optimiert sind. Hierzu wird für die Helligkeitsoptimierung eine Gaußfunktion als Basis gewählt, deren Parameter so gewählt werden, dass in definierbaren Winkelbereichen die Lichtstärkeverteilung so angepasst wird, dass Parameter wie eine durchschnittliche Fahrbahnleuchtdichte oder eine bestimmte horizontale Gleichmäßigkeit erreicht werden. Das segmentierte Fahrlicht wird basierend auf dem Visibility Level VL, welches für eine sichere Objektdetektion erforderlich ist, generiert. Hierzu wird das maximal erforderliche Visibility Level für alle relevanten Bereiche der Lichtstärkeverteilung herangezogen, da das segmentierte Fahrlicht die Möglichkeit bietet alle Segmente einzeln anzusteuern und zu dimmen. Somit ist eine gezielte Intensitätsreduktion jederzeit realisierbar und die sichere Objektdetektion aufgrund der maximal einstellbaren Lichtstärke I in einem großen Einstellbereich gewährleistet.

Um die Aussagekraft der durchgeführten Studien in der Zukunft weiter zu erhöhen, sind folgende Erweiterungsoptionen in Betracht zu ziehen. Die in den durchgeführten Studien verwendeten Graukarten mit einem

Reflexionsgrad von etwa 4 % stellen eine „Worst Case“ Betrachtung dar. Für zukünftige Studien ist es daher ratsam, die Objektgröße, Objektform und den Reflexionsgrad zu variieren und somit deren Einfluss auf die Detektionsbedingungen zu untersuchen. Des Weiteren sollte das Versuchspersonenkollektiv vor allem mit Versuchspersonen höheren Alters erweitert werden, um den Einfluss des Beobachteralters auf die Objektdektionswahrscheinlichkeit gezielt zu untersuchen. Eine weitere nützliche Erweiterung der durchgeführten Studien stellt die Verwendung von Teststraßen dar, welche einstellbare Straßenbeleuchtungssysteme aufweist. Somit wäre eine Betrachtung der gegenseitigen Beeinflussung der Kfz- und der Straßenbeleuchtung unter sonst gleichen und kontrollierbaren Bedingungen möglich und die erhaltenen Ergebnisse besser vergleichbar.

Zuletzt werden Anreize für zukünftige Arbeiten, welche auf der vorliegenden Arbeit aufbauen, gegeben. So ist es mit den in Kapitel 6 hergeleiteten Modellen möglich, verschiedene Lichtverteilungen für hochauflösende Frontscheinwerfersysteme zu generieren. Diese generierten Lichtstärkeverteilungen sind dann in dynamischen Felduntersuchungen zu validieren und sowohl untereinander als auch mit konventionellen Abblend- und Fernlichtverteilungen bezüglich des Helligkeitseindrucks im Fahrzeugvorfeld und der Objektdetektion zu vergleichen und weiter zu optimieren.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass vor allem im urbanen Verkehrsraum aufgrund seiner hohen Komplexität eine statisch optimierte Lichtstärkeverteilung nicht zielführend ist. Hier ist in weiteren Untersuchungen und Forschungsarbeiten ein System zu entwickeln, welches eine kamerabasierte und dynamisch adaptive Lichtverteilungsregelung realisiert. Hierfür sind zuerst Vergleichsuntersuchungen notwendig, bei denen die Helligkeitsbewertung und Objektdetektion nicht mehr durch einen menschlichen Fahrzeugführer erfolgt, sondern durch die Kamera und einen entsprechend implementierten Algorithmus. Anschließend ist ein Algorithmus zu implementieren, welcher die erforderlichen Informationen wie Fahrbahnleuchtdichte oder Visibility Level VL aus den Aufnahmen extrahiert und bei Bedarf die einzelnen Segmente hochauflösender Scheinwerfersysteme entsprechend ansteuert.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Adrian. „Visibility Levels in Street Lighting: An Analysis of Different Experiments“. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 22.2 (1993), S. 49–52. ISSN: 0099-4480. DOI: 10.1080/00994480.1993.10748039.
- [2] W. Adrian. „Visibility Levels under Night-time Driving Conditions“. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 16.2 (1987), S. 3–12. ISSN: 0099-4480. DOI: 10.1080/00994480.1987.10748682.
- [3] W. Adrian. „Visibility of targets: Model for calculation“. In: *Lighting Research & Technology* 21.4 (1989), S. 181–188. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/096032718902100404.
- [4] W. Adrian. „Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die Möglichkeit ihrer Berechnung“. In: *Lichttechnik* 21 (1968).
- [5] W. Adrian. „Über den Zusammenhang zwischen Sehschwelle und Umfeldgröße“. In: *Optik* 28 (1968), S. 132–141.
- [6] W. Adrian und R. Gibbons. „Visibility level und die Sichtbarkeit in der Straßenbeleuchtung“. In: *Licht* 10 (1993), S. 734–739.
- [7] Y. Akashi, M. S. Rea und J. D. Bullough. „Driver decision making in response to peripheral moving targets under mesopic light levels“. In: *Lighting Research & Technology* 39.1 (2007), S. 53–67. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1365782806071608.
- [8] K. F. Albrecht, A. Austerschulte und E.-O. Rosenhahn. „Safety Benefit by ultra-flexible Beam Pattern in High Resolution Headlamp Technology“. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2022, S. 262–271. ISBN: 978-3-8316-4953-2.
- [9] M. Artmann. „System integration for high resolution front lighting“. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017, S. 233–242. ISBN: 978-3-8316-4671-5.
- [10] AUDI AG. *Licht | Audi MediaCenter*. 10.06.16. URL: <https://www.audi-mediacyenter.com/de/fotos/detail/audi-a5-coupe-33916>.
- [11] E. Aulhorn und H. Harms. „Untersuchungen über das Wesen des Grenzkontrastes“. In: *Ber. Dtsch. Ophthal. Ges.* 60 (1956), S. 7–10.
- [12] E. Aulhorn. „Der Dunkelheitsunfall“. In: *Entschließungen des 7. Deutschen Verkehrsgerichtstages in Goslar vom 30. Januar bis 2. Februar 1969*, S. 70–78.
- [13] E. Aulhorn. „Ermittlung der Tauglichkeitsgrenzen beim Dämmerungssehen“. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 17 (1971), S. 196–206.
- [14] E. Aulhorn. „Über die Beziehung zwischen Lichtsinn und Sehschärfe“. In: *Albrecht von Graefes Archiv fr Ophthalmologie Vereinigt mit Archiv fr Augenheilkunde* 167.1 (1964), S. 4–74. ISSN: 0721-832X.

-
- [15] E. Aulhorn und H. Harms. „Über die Untersuchung der Nachtfahreignung von Kraftfahrern mit dem Mesoptometer“. In: *Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde* 157 (1970). ISSN: 0023-2165.
- [16] A. Bacelar. „The contribution of vehicle lights in urban and peripheral urban environments“. In: *Lighting Research & Technology* 36.1 (2004), S. 69–76. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1191/1477153504li105oa.
- [17] A. Bacelar, J. Cariou und M. Hamard. „Calculational visibility model for road lighting installations“. In: *Lighting Research & Technology* 31.4 (1999), S. 177–180. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/096032719903100407.
- [18] R. Baer, M. Barfuß und D. Seifert, Hrsg. *Beleuchtungstechnik*. 4. Auflage. Berlin: Huss-Medien GmbH, 2016. ISBN: 9783341016343.
- [19] M. Berek. „Zum physiologischen Grundgesetz der Wahrnehmung von Lichtreizen“. In: *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 63 (1943).
- [20] S. Berlitz und S. Prenninger. „Digital light for digital life“. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2022, S. 233–242. ISBN: 978-3-8316-4953-2.
- [21] S. Berlitz, M. Hamm und C. Funk. „Matrix-LED-Scheinwerfer von Audi“. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 116.3 (2014), S. 10–15. ISSN: 0001-2785. DOI: 10.1007/s35148-014-0350-1.
- [22] R. Bhagavathula, R. Gibbons und M. Nussbaum. „Does the Interaction between Vehicle Headlamps and Roadway Lighting Affect Visibility? A Study of Pedestrian and Object Contrast“. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE Technical Paper Series. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2020. DOI: 10.4271/2020-01-0569.
- [23] H. R. Blackwell. „Contrast Thresholds of the Human Eye“. In: *Journal of the Optical Society of America* 36.11 (1946), S. 624. ISSN: 0030-3941. DOI: 10.1364/JOSA.36.000624.
- [24] O. M. Blackwell und H. R. Blackwell. „Individual Responses to Lighting Parameters for a Population of 235 Observers of Varying Ages“. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 9.4 (1980), S. 205–232. ISSN: 0099-4480. DOI: 10.1080/00994480.1980.10747901.
- [25] A. Blöbaum und M. Hunecke. „Perceived Danger in Urban Public Space“. In: *Environment and Behavior* 37.4 (2005), S. 465–486. ISSN: 0013-9165. DOI: 10.1177/0013916504269643.
- [26] W. Bockelmann. *Auge, Brille, Auto: Besser sehen, sicher fahren*. 2. Aufl. Berlin und , New York: Springer Verlag, 1987. ISBN: 3540164294.
- [27] C. Boomsma und L. Steg. „Feeling Safe in the Dark“. In: *Environment and Behavior* 46.2 (2014), S. 193–212. ISSN: 0013-9165. DOI: 10.1177/0013916512453838.
- [28] P. R. Boyce, N. H. Eklund, B. J. Hamilton et al. „Perceptions of safety at night in different lighting conditions“. In: *Lighting Research & Technology* 32.2 (2000), S. 79–91. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/096032710003200205.
- [29] R. Brémond, V. Bodard, E. Dumont et al. „Target visibility level and detection distance on a driving simulator“. In: *Lighting Research & Technology* 45.1 (2013), S. 76–89. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153511433782.
- [30] R. Brémond, E. Dumont, V. Ledoux et al. „Photometric measurements for visibility level computations“. In: *Lighting Research & Technology* 43.1 (2011), S. 119–128. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153510377271.
- [31] R. Brémond und A. Mayeur. „Some Drawbacks of the Visibility Level as an Index of Visual Performance while Driving“. In: *Commission Internationale de l’Eclairage (CIE) - Conference July 2011*.

-
- [32] R. Brückmann, W. Gottlieb, J. Hatzius et al. „Blickbewegungen des Fahrers bei Nacht bei alternativen Kfz-Scheinwerfern“. In: *Blickfixationen und Blickbewegungen des Fahrzeugfuehrers sowie Hauptsichtbereiche an der Windschutzscheibe (FAT-Schriftenreihe Nr. 151)*. Hrsg. von R. Brückmann. Frankfurt a.M, 2000, S. 105–187.
- [33] R. Brückmann, W. Gottlieb, J. Hatzius et al. „Blickbewegungen des Fahrers bei Nacht bei alternativen Kfz-Scheinwerfern“. In: *Blickfixationen und Blickbewegungen des Fahrzeugfuehrers sowie Hauptsichtbereiche an der Windschutzscheibe (FAT-Schriftenreihe Nr. 151)*. Hrsg. von R. Brückmann. Frankfurt a.M, 2000.
- [34] D. Brunne und F.-J. Kalze. „Outlook on high resolution pixel light“. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017, S. 243–251. ISBN: 978-3-8316-4671-5.
- [35] J. Bullough. „Visual performance from automobile headlamps along high-speed curves“. In: *Advances in Natural and Applied Sciences* 3 (2009).
- [36] J. Bullough und N. Skinner. „Predicting stopping distances under different types of headlamp illumination“. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Utz, 2009. ISBN: 978-3-8316-0904-8.
- [37] J. D. Bullough. „Modeling Peripheral Visibility Under Headlamp Illumination“. In: *Transportation Research Board 16th Biennial Symposium on Visibility and Simulation* (2002).
- [38] J. D. Bullough. „Roadway lighting: evolution and evaluation“. In: *Sustainability for Road Infrastructure [supplement to ITS International 16(6)]* (2011).
- [39] J. D. Bullough, E. T. Donnell und M. S. Rea. „To illuminate or not to illuminate: roadway lighting as it affects traffic safety at intersections“. In: *Accident; analysis and prevention* 53 (2013), S. 65–77. DOI: 10.1016/j.aap.2012.12.029.
- [40] J. D. Bullough und M. S. Rea. „Visibility from Vehicle Headlamps and Roadway Lighting in Urban, Suburban and Rural Locations: sae10b“. In: *SAE International* (2010). DOI: 10.4271/2010-01-0298.
- [41] J. D. Bullough und J. van Derlofske. „Headlamp Illumination and Glare: An Approach to Predicting Peripheral Visibility“. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2004. DOI: 10.4271/2004-01-1094.
- [42] J. D. Bullough, J. van Derlofske und Y. Akashi. „Strategies for Optimizing Headlamp Illumination and Visibility Along Curves“. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2006.
- [43] Bundesanstalt für Straßenwesen. *Verkehrs- und Unfalldaten – Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland*. 2019.
- [44] Bundeszentrale für politische Bildung. *Verstädterung*. 14.01.2022. URL: <https://www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52705/verstaedterung/?zahlenfakten=detail>.
- [45] B. Buyukkinaci, S. Onaygil, O. Guler et al. „Determining minimum visibility levels in different road lighting scenarios“. In: *Lighting Research & Technology* 50.7 (2018), S. 1045–1056. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153517709868.
- [46] C. Cengiz, H. Kotkanen, M. Puolakka et al. „Combined eye-tracking and luminance measurements while driving on a rural road: Towards determining mesopic adaptation luminance“. In: *Lighting Research & Technology* 46.6 (2014), S. 676–694. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153513503361.

-
- [47] Y. S. Chang, S. J. Jo, Y.-T. Lee et al. „Population Density or Populations Size. Which Factor Determines Urban Traffic Congestion?“ In: *Sustainability* 13.8 (2021), S. 4280. DOI: 10.3390/su13084280.
- [48] W. N. Charman. „Vision and driving - a literature review and commentary“. In: *Ophthalmic and Physiological Optics* 17.5 (1997), S. 371–391. DOI: 10.1111/j.1475-1313.1997.tb00070.x.
- [49] M. Chmielarz, W. Schneider, A. Sprenger et al. „Blickverteilung beim Fahren in PKW bei Nacht“. In: *Blickfixationen und Blickbewegungen des Fahrzeugfuehrers sowie Hauptsichtbereiche an der Windschutzscheibe (FAT-Schriftenreihe Nr. 151)*. Hrsg. von R. Brückmann. Frankfurt a.M, 2000.
- [50] M. Chmielarz und A. Sprenger. „Blickverteilung beim Fahren in Pkw bei Tageslicht“. In: *Blickfixationen und Blickbewegungen des Fahrzeugfuehrers sowie Hauptsichtbereiche an der Windschutzscheibe (FAT-Schriftenreihe Nr. 151)*. Hrsg. von R. Brückmann. Frankfurt a.M, 2000.
- [51] S. Cladé, M. Courcier, S. Roels et al. „4K Pixel Solid State Glare Free High Beam“. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2019, S. 269–279. ISBN: 978-3-8316-4817-7.
- [52] A. S. Cohen und R. Hirsig. „Zur Bedeutung des fovealen Sehens für die Informationsaufnahme bei hoher Beanspruchung“. In: (1990).
- [53] Commission International de l'Éclairage. *An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance*. Bd. 19/2.1. Publication CIE. Paris: Bureau Central de la CIE, 1981. ISBN: 978 92 9034 019 5.
- [54] Commission International de l'Éclairage. *An Analytic Model for describing the Influence of Lighting Parameters upon Visual Performance - Volume II: Summary and Application Guidelines*. Wien, Photocopy Edition 1997.
- [55] Commission International de l'Éclairage. *Road surface and road marking reflection characteristics*. Wien, 2001.
- [56] J. Damasky. „Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer“. Dissertation. Darmstadt: Technische Hochschule Darmstadt, 1995.
- [57] J. Damasky und A. Hosemann. „The Influence of the Light Distribution of Headlamps on Drivers Fixation Behaviour at Nighttime“. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE Technical Paper Series. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1998. DOI: 10.4271/980319.
- [58] J. B. de Boer. „The application of sodium lamps to public lighting“. In: *Illuminating Engineering* 56.4 (1961), S. 293–312.
- [59] J. B. de Boer. „Visual perception in road traffic and the field of vision of the motorist“. In: *Public Lighting*. Hrsg. von J. B. de Boer. Philips Technical Library. London: Cleaver-Hume, 1967, S. 11–96.
- [60] D. Dergez, S. Schwarz, R. Führinger et al. „Evolution of bandwidth requirements in pixelated light distributions“. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2022, S. 252–261. ISBN: 978-3-8316-4953-2.
- [61] Deutsches Institut für Normung. *DIN 13201-1:2005-11, Straßenbeleuchtung_ - Teil_1: Auswahl der Beleuchtungsklassen*. Berlin. DOI: 10.31030/3121968.
- [62] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 13201-2:2016-06, Straßenbeleuchtung_ - Teil_2: Gütemerkmale; Deutsche Fassung EN_13201-2:2015*. Berlin. DOI: 10.31030/2275375.
- [63] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 13201-3:2016-06, Straßenbeleuchtung_ - Teil_3: Berechnung der Gütemerkmale; Deutsche Fassung EN_13201-3:2015*. Berlin. DOI: 10.31030/2275376.

-
- [64] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 13201-4:2016-06, Straßenbeleuchtung_ - Teil_4: Methoden zur Messung der Gütemerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen; Deutsche Fassung EN_13201-4:2015*. Berlin. DOI: 10.31030/2275664.
- [65] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN 13201-5:2016-06, Straßenbeleuchtung_ - Teil_5: Energieeffizienzindikatoren; Deutsche Fassung EN_13201-5:2015*. Berlin. DOI: 10.31030/2275665.
- [66] C. Diem. *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. Darmstädter Lichttechnik. München: Utz, 2005. ISBN: 3-8316-0451-7.
- [67] E. Dumont, R. Brémond und N. Hautière. „Night-time visibility as a function of headlamps beam patterns and pavement reflection properties“. In: *VISION 2008* (2008).
- [68] M. Eloholma, J. Ketomäki, P. Orreveteläinen et al. „Visual performance in night-time driving conditions“. In: *Ophthalmic and Physiological Optics* 26.3 (2006), S. 254–263. ISSN: 0275-5408. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2006.00313.x.
- [69] L. Evrard, B. Reiss, J. Ripperger et al. „Modularer Aufbau für blendfreies LED-Fernlicht“. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 117.2 (2015), S. 26–31. ISSN: 0001-2785. DOI: 10.1007/s35148-015-0376-z.
- [70] G. T. Fechner. *Elemente der Psychophysik: Erster Theil*. Leipzig: Breitkopf und Härtel, 1860. ISBN: 978-1167635540.
- [71] A. Field, J. Miles und Z. Field. *Discovering statistics using R*. Reprint. Los Angeles, Calif.: Sage, 2013. ISBN: 978-1-4462-0045-2.
- [72] S. Fotios und C. Cheal. „Using obstacle detection to identify appropriate illuminances for lighting in residential roads“. In: *Lighting Research & Technology* 45.3 (2013), S. 362–376. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153512444112.
- [73] S. Fotios, C. J. Robbins und J. Uttley. „A comparison of approaches for investigating the impact of ambient light on road traffic collisions“. In: *Lighting Research & Technology* 19 (2020), S. 147715352092406. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153520924066.
- [74] S. Fotios, J. Unwin und S. Farrall. „Road lighting and pedestrian reassurance after dark: A review“. In: *Lighting Research & Technology* 47.4 (2015), S. 449–469. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153514524587.
- [75] A. Freiding. „Untersuchungen zur spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im mesopischen Bereich“. Diss. Darmstadt: Technische Universität, 2010.
- [76] S. Frings und F. Müller. *Biologie der Sinne*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. ISBN: 978-3-662-58349-4. DOI: 10.1007/978-3-662-58350-0.
- [77] D. Gall und E. Thiele. „Adaptationsleuchtdichte und mittlere Leuchtdichte bei direktem und indirektem Sehen“. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Ilmenau*, 14.3 (1968), S. 321–325.
- [78] L. Garay-Vega, D. L. Fisher und A. Pollatsek. „Hazard Anticipation of Novice and Experienced Drivers“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2009.1 (2007), S. 1–7. ISSN: 0361-1981. DOI: 10.3141/2009-01.
- [79] R. B. Gibbons, T. Terry, R. Bhagavathula et al. „Applicability of mesopic factors to the driving task“. In: *Lighting Research & Technology* 48.1 (2016), S. 70–82. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/1477153515624003.
- [80] E. B. Goldstein. *Sensation and Perception*. 8th ed. Belmont, Calif.: Wadsworth, 2014. ISBN: 978-1-133958-49-9.

-
- [81] C. P. Graf und M. J. Krebs. *Headlight Factors and Nighttime Vision: Final Report*. DOT HS-802 102. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 1976. URL: <https://books.google.de/books?id=YYFSHAAACAAJ>.
- [82] M. Grüner und U. Ansorge. „Mobile Eye Tracking During Real-World Night Driving: A Selective Review of Findings and Recommendations for Future Research“. In: *Journal of eye movement research* 10.2 (2017). DOI: 10.16910/jemr.10.2.1.
- [83] C. Gut, M. Fiege und B. Böke. „DIGITAL LIGHT – Experiences with the development of high resolution headlights at Daimler“. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017, S. 253–261. ISBN: 978-3-8316-4671-5.
- [84] C. Gut, A. Ruggiero und B. Böke. „DIGITAL LIGHT takes the Mercedes-Benz Adaptive High Beam Assist to the next level“. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2022, S. 243–251. ISBN: 978-3-8316-4953-2.
- [85] A. Haans und Y. A. de Kort. „Light distribution in dynamic street lighting: Two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape“. In: *Journal of Environmental Psychology* 32.4 (2012), S. 342–352. ISSN: 02724944. DOI: 10.1016/j.jenvp.2012.05.006.
- [86] M. Hamm. „Real Driving Benefits and Research Findings with Digital Light Functions“. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2019, S. 229–238. ISBN: 978-3-8316-4817-7.
- [87] M. Hamm und A. Friedrich. „Intelligente, adaptive Scheinwerfersysteme: Die Fahrzeug-Außenbeleuchtung der Zukunft“. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 102.12 (2000), S. 1042–1047. ISSN: 0001-2785. DOI: 10.1007/BF03224334.
- [88] F. Han, R. Xie und M. Lai. „Traffic density, congestion externalities, and urbanization in China“. In: *Spatial Economic Analysis* 13.4 (2018), S. 400–421. ISSN: 1742-1772. DOI: 10.1080/17421772.2018.1459045.
- [89] H.-J. Hentschel, Hrsg. *Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik*. 5. Heidelberg: Hüthig, 2002. ISBN: 3-7785-2817-3.
- [90] B. L. Hills. „Visibility under night driving conditions“. In: *Lighting Research & Technology* 7.4 (1975), S. 251–258. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/096032717500700404.
- [91] B. L. Hills. „Visibility under night driving conditions“. In: *Lighting Research & Technology* 8.1 (1976), S. 11–26. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/14771535760080010701.
- [92] B. L. Hills. „Vision, visibility, and perception in driving“. In: *Perception* 9.2 (1980), S. 183–216. ISSN: 0301-0066. DOI: 10.1068/p090183.
- [93] Illuminating Engineering Society of North America. *American national standard practice for roadway lighting*. 2005 [ed.] Bd. RP-8-00. ANSI/IESNA. New York, N.Y.: Illuminating Engineering Society of North America, 2005], 1999. ISBN: 0-87995-160-5.
- [94] K. W. Ising. „Threshold Visibility Levels Required for Nighttime Pedestrian Detection in a Modified Adrian/CIE Visibility Model“. In: *LEUKOS* 5.1 (2008), S. 63–75. ISSN: 1550-2724. DOI: 10.1080/15502724.2008.10747629.
- [95] K. W. Ising und M. Green. „The Distribution of Visibility Levels at Target Detection in a Modified Adrian/CIE Visibility Model“. In: *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings* 53.23 (2009), S. 1796–1800. ISSN: 10711813. DOI: 10.1518/107118109X12524444082312.

-
- [96] S. Iwamoto. „Verified improvements in visibility with high-resolution system in headlights“. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017, S. 367–375. ISBN: 978-3-8316-4671-5.
- [97] M. J. Jackett und W. J. Frith. *How does the level of road lighting affect crashes in New Zealand – A pilot study*. 2012.
- [98] M. Jackett und W. Frith. „Quantifying the impact of road lighting on road safety — A New Zealand Study“. In: *IATSS Research* 36.2 (2013), S. 139–145. ISSN: 03861112. DOI: 10.1016/j.iatssr.2012.09.001.
- [99] B. Kleinert. „Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen“. Dissertation. Technische Universität Ilmenau, 2016.
- [100] B. Kleinert, M. Marutzky, S. Bogdanow et al. „Anforderungen an ein adaptives Abblendlicht für spiegelnde Fahrbahnoberflächen“. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 120.10 (2018), S. 78–85. ISSN: 0001-2785. DOI: 10.1007/s35148-018-0132-2.
- [101] M. Kleinkes, W. Pohlmann und C. Wilks. „Boost Safety & Styling – New HD-LED Systems for front and rear“. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2019, S. 249–258. ISBN: 978-3-8316-4817-7.
- [102] M. Kleinkes, W. Pohlmann und C. Wilks. „SSL|HD – High Tech Light for new safety & comfort functions“. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2022, S. 272–283. ISBN: 978-3-8316-4953-2.
- [103] M. Kleinkes. *Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen*. 1. Auflage. Berichte aus der Physik. Aachen: Shaker, 2003. ISBN: 3-8322-1784-3.
- [104] A. Kline, D. Kline und T. Kline. „The Adrian/CIE Visibility Model: A Visibility Level Calculator & Future Research“. In: *Journal of Science and Technology in Lighting* (2020). ISSN: 2432-3225. DOI: 10.2150/jstl.IEIJ200000640.
- [105] J. Kobbert. „Optimization of Automotive Light Distributions for Different Real Life Traffic Situations“. Diss. Darmstadt: Technische Universität, 2019.
- [106] S. Köhler, B. Fischer und A. Klarius. „Imaging Optics for High-Resolution Headlamps“. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2019, S. 281–290. ISBN: 978-3-8316-4817-7.
- [107] S. Köhler. „Messtechnische Bestimmung von Leuchtdichtkoeffizienten für Fahrbahndeckschichten unter flachen Anstrahlwinkeln“. Dissertation. 2011.
- [108] S. Kokoschka und D. Gall. *FASIVAL - Entwicklung und Validierung eines Sichtweitenmodells zur Bestimmung der Fahrersichtweite*.
- [109] K. Kosmas. „Optimierung von adaptiven Kfz-Scheinwerfertechnologien zur Blendungsbegrenzung unter dynamischen Bedingungen“. Diss. Darmstadt: Technische Universität, 2019.
- [110] H. Lange, Hrsg. *Handbuch für Beleuchtung*. Sonderausgabe; 5., völlig neu bearb. Landsberg: ecomed Sicherheit, 1992. ISBN: 3-609-75390-0.
- [111] H. Lee. „The Study of Functionality for Now and Future High Definition Lighting“. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2019, S. 299–308. ISBN: 978-3-8316-4817-7.

- [112] H. S. Levinson und J. C. Falocchchio. „Urban Development and Traffic Congestion“. In: *Transportation and Development Institute Congress 2011*. Hrsg. von I. Al-Qadi und S. Murrell. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 3112011, S. 948–956. ISBN: 978-0-7844-1167-4. DOI: 10.1061/41167(398)90.
- [113] R. Lingard und M. Rea. „Off-Axis Detection at Mesopic Light Levels in a Driving Context“. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 31.1 (2002), S. 33–39. ISSN: 0099-4480. DOI: 10.1080/00994480.2002.10748370.
- [114] M. R. Linschoten, L. O. Harvey, P. M. Eller et al. „Fast and accurate measurement of taste and smell thresholds using a maximum-likelihood adaptive staircase procedure“. In: *Perception & psychophysics* 63.8 (2001), S. 1330–1347. ISSN: 0031-5117. DOI: 10.3758/BF03194546.
- [115] J. Locher. „Der Einfluss der Kfz-Lichtverteilung auf Sicherheit und Akzeptanz“. In: *Tagungsband zur Tagung OWL*. Hrsg. von OWL. 2002, S. 4–14.
- [116] L. J. Loewen, G. D. Steel und P. Suedfeld. „Perceived safety from crime in the urban environment“. In: *Journal of Environmental Psychology* 13.4 (1993), S. 323–331. ISSN: 02724944. DOI: 10.1016/S0272-4944(05)80254-3.
- [117] A. Mayeur, R. Bremond und J. C. Bastien. „The effect of the driving activity on target detection as a function of the visibility level: Implications for road lighting“. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 13.2 (2010), S. 115–128. ISSN: 13698478. DOI: 10.1016/j.trf.2009.12.004.
- [118] A. Mayeur, R. Brémond und J. M. C. Bastien. „Effects of the viewing context on target detection. Implications for road lighting design“. In: *Applied ergonomics* 41.3 (2010), S. 461–468. DOI: 10.1016/j.apergo.2009.10.002.
- [119] Mercedes-Benz Group AG. *Weltpremiere in der Mercedes-Maybach S-Klasse: DIGITAL LIGHT: Das Licht der Zukunft kommt auf die Straße*. 5.03.2018. URL: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Weltpremiere-in-der-Mercedes-Maybach-S-Klasse-DIGITAL-LIGHT-Das-Licht-der-Zukunft-kommt-auf-die-Strasse.xhtml?oid=33898368>.
- [120] K. Narisada und K. Yoshikawa. „Tunnel entrance lighting—effect of fixation point and other factors on the determination of requirements“. In: *Lighting Research and Technology* 6 (1974), S. 9–18. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/096032717400600102.
- [121] C. Neumann und T. Q. Khanh. „Lichtfunktionen im Kraftfahrzeug – eine Übersicht“. In: *LICHT 2021 - Der 24. Europäische Lichtkongress*.
- [122] S. Omerbegovic, J. Reim und C. Funk. „Construction zone light: A study on safety and distraction“. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017, S. 307–314. ISBN: 978-3-8316-4671-5.
- [123] G. Osterberg. „Topography of the Layer of Rods and Cones in the Human Retina“. In: *Acta Ophthalmologica* 6 (1935), S. 1–103.
- [124] H. Oya, K. Ando und H. Kanoshima. „A Research on Interrelation between Illuminance at Intersections and Reduction in Traffic Accidents“. In: *Journal of Light & Visual Environment* 26.1 (2002), S. 29–34. ISSN: 0387-8805. DOI: 10.2150/jlve.26.1_29.
- [125] A. Peña-García, A. Hurtado und M. C. Aguilar-Luzón. „Impact of public lighting on pedestrians’ perception of safety and well-being“. In: *Safety Science* 78 (2015), S. 142–148. ISSN: 09257535. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.04.009.

-
- [126] N. Pfullmann, A. Thiel, M. Thamm et al. „From mechanical ADB systems to high resolution head lamps – new opportunities of novel headlight systems“. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017, S. 357–365. ISBN: 978-3-8316-4671-5.
- [127] S. Plainis und I. J. Murray. „Reaction times as an index of visual conspicuity when driving at night“. In: *Ophthalmic and Physiological Optics* 22.5 (2002), S. 409–415. ISSN: 0275-5408. DOI: 10.1046/j.1475-1313.2002.00076.x.
- [128] S. Plainis, I. J. Murray und I. G. Pallikaris. „Road traffic casualties: understanding the night-time death toll“. In: *Injury prevention : journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention* 12.2 (2006), S. 125–128. ISSN: 1353-8047. DOI: 10.1136/ip.2005.011056.
- [129] R. D. Portugal und B. F. Svaiter. „Weber-Fechner Law and the Optimality of the Logarithmic Scale“. In: *Minds and Machines* 21.1 (2011), S. 73–81. ISSN: 0924-6495. DOI: 10.1007/s11023-010-9221-z.
- [130] E. Randrup Hansen und J. Schandel Larsen. „Reflection factors for pedestrian’s clothing“. In: *Lighting Research & Technology* 11.3 (1979), S. 154–157. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/14771535790110-030301.
- [131] M. S. Rea. „Toward a Model of Visual Performance: Foundations and Data“. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 15.2 (1986), S. 41–57. ISSN: 0099-4480. DOI: 10.1080/00994480.1986.10748655.
- [132] M. S. Rea und M. J. Ouellette. „Relative visual performance: A basis for application“. In: *Lighting Research & Technology* 23.3 (1991), S. 135–144. ISSN: 1477-1535.
- [133] M. S. Rea und M. J. Ouellette. „Visual performance using reaction times“. In: *Lighting Research & Technology* 20.4 (1988), S. 139–153. ISSN: 1477-1535.
- [134] E.-O. Rosenhahn und F. Link. „Traffic Safety Benefits provided by High Resolution Headlamp Systems“. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2019, S. 239–248. ISBN: 978-3-8316-4817-7.
- [135] E.-O. Rosenhahn. „AFS–Frontlighting on the Basis of LED Light Sources“. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2007, S. 80–87. ISBN: 978-3-8316-0711-2.
- [136] J. Roth, M. Thamm, M. P. Held et al. „Micro-Pixel-LED-Headlights“. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2019, S. 259–268. ISBN: 978-3-8316-4817-7.
- [137] W. A. RUSHTON. „Rhodopsin measurement and dark-adaptation in a subject deficient in cone vision“. In: *The Journal of physiology* 156 (1961), S. 193–205. ISSN: 0022-3751. DOI: 10.1113/jphysiol.1961.sp006668.
- [138] C. Schierz. „Die Psychophysik der Wahrnehmungsschwelle: Von Weber und Fechner zur Signaldetektionstheorie“. In: *Tagungsband Lux junior 2013*. Hrsg. von LiTG und Technische Universität Ilmenau. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2013. ISBN: 978-3-927787-46-9.
- [139] R. F. Schmidt, F. Lang und G. Thews, Hrsg. *Physiologie des Menschen: mit Pathophysiologie*. 29., vollst. neu bearb. u. aktualisierte. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg [u.a.]: Springer, 2005. ISBN: 3-540-21882-3. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/314648853>.
- [140] H.-J. Schmidt-Clausen. „Über das Wahrnehmen verschiedenartiger Lichtimpulse bei veränderlichen Umfeldleuchtdichten“. In: *Lichttechnik* 21.11 (1969), S. 126–132.

- [141] H.-J. Schmidt-Clausen und A. Freiding. *Sehvermögen von Kraftfahrern und Lichtbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr*. Bd. 158. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen M, Mensch und Sicherheit. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wiss, 2004. ISBN: 3-86509-102-4.
- [142] D. Schneider. *Markierungslicht - eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern: Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2011*. Darmstädter Lichttechnik. München: Utz, 2011. ISBN: 978-3-8316-4116-1.
- [143] K. Schneider. „Object contrast determination based on peripheral Vision undernight-time driving conditions“. Diss. Darmstadt: Technische Universität, 2018.
- [144] D. A. Schreuder. *Straßenbeleuchtung für Sicherheit und Verkehr*. Aachen: Shaker, 2001. ISBN: 978-3-82-658113-7.
- [145] P. P. Scott. *The Relationship Between Road Lighting Quality and Accident Frequency*. TRRL laboratory report. Transport and Road Research Laboratory, 1980.
- [146] E. Setyaningsih, L. Suryo Putranto, Soegijanto et al. „Analysis of the visual safety perception and the clarity of traffic signs and road markings in the presence of road lighting in straight and curved road“. In: *MATEC Web of Conferences* 181 (2018), S. 04001. DOI: 10.1051/mateconf/201818104001.
- [147] B. Simon. *Endlich sichere Nachtfahrt!* Hrsg. von Bosch Global. 6.08.2018. URL: <https://www.bosch.com/de/stories/bosch-geschichte-fahrzeugbeleuchtungssysteme/>.
- [148] R. H. Simons, R. A. Hargroves, N. E. Pollard et al. „Lighting criteria for residential roads and areas“. In: *Proceedings of the CIE* (1987), S. 274–277.
- [149] M. Sivak. „The information that drivers use: is it indeed 90% visual?“ In: *Perception* 25.9 (1996), S. 1081–1089. ISSN: 0301-0066. DOI: 10.1068/p251081.
- [150] J. H. Sprute. „Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen“. Diss. Darmstadt: Technische Universität, 2012.
- [151] Statistisches Bundesamt. *Verkehrsunfälle - Zeitreihen - 2021*. 2022.
- [152] *Straßenverkehrs-Ordnung ; Textausgabe*. 13., neu bearbeitete Auflage, Stand: 1. November 2017. Beck'sche Textausgaben. München: C.H.Beck, 2018. ISBN: 978-3-406-71764-2.
- [153] J. M. Sullivan und M. J. Flannagan. „The role of ambient light level in fatal crashes: inferences from daylight saving time transitions“. In: *Accident Analysis & Prevention* 34.4 (2002), S. 487–498. ISSN: 00014575. DOI: 10.1016/S0001-4575(01)00046-X.
- [154] Y. Takahashi, Y. Kita und M. Uchida. „Development of 288 segments matrix ADB system with improved visibility and safety“. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017, S. 323–332. ISBN: 978-3-8316-4671-5.
- [155] R. Tamburo, E. Nurvitadhi, A. Chugh et al. „Programmable Automotive Headlights“. In: *Computer Vision – ECCV 2014*. Hrsg. von D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele et al. Bd. 8692. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 750–765. ISBN: 978-3-319-10592-5. DOI: 10.1007/978-3-319-10593-2_49.
- [156] A. Totzauer. *Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht: Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2013*. Darmstädter Lichttechnik. München: Utz, 2013. ISBN: 978-3-8316-4295-3.
- [157] J. Trommer, T. Feil, D. Weissenberger et al. „New Possibilities with microAFS modules – The Path to High-Resolution Full-Matrix Headlamps“. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017, S. 333–341. ISBN: 978-3-8316-4671-5.

-
- [158] G. Underwood. „Visual attention and the transition from novice to advanced driver“. In: *Ergonomics* 50.8 (2007), S. 1235–1249. ISSN: 0014-0139. DOI: 10.1080/00140130701318707.
- [159] UNECE. *ECE-R112: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing-beam or a driving-beam or both and equipped with filament lamps and/or light-emitting diode (LED) modules*. Geneve, 2013.
- [160] UNECE. *ECE-R123: Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles*. Geneve, 2013.
- [161] UNECE. *ECE-R149: Uniform provisions concerning the approval of road illumination devices (lamps) and systems for power-driven vehicles*. Geneve, 2020.
- [162] UNECE. *ECE-R8: Uniform Provisions Concerning The Approval Of Motor Vehicle Headlamps Emitting An Asymmetrical Passing Beam Or A Driving Beam Or Both And Equipped With Halogen Filament Lamps (H1, H2, H3, HB3, HB4, H7, H8, H9, HIR1, HIR2 and/or H11)*. Geneve, 2002.
- [163] UNECE. *ECE-R98: Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps equipped with gas-discharge light sources*. Geneve, 2012.
- [164] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.241*. 2015.
- [165] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366)*. 2015.
- [166] J. van Derlofske und J. D. Bullough. „Spectral Effects of High-Intensity Discharge Automotive Forward Lighting on Visual Performance“. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2003.
- [167] J. van Derlofske, J. D. Bullough und C. M. Hunter. „Evaluation of High-Intensity Discharge Automotive Forward Lighting“. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2001.
- [168] J. van Derlofske, J. D. Bullough und C. M. Hunter. „Visual Benefits of High-Intensity Discharge Automotive Forward Lighting“. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2002.
- [169] M. Viršek. „Automotive car-body lighting digital projector based on LCoS technology“. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: utzverlag GmbH, 2022, S. 222–232. ISBN: 978-3-8316-4953-2.
- [170] S. Vogel, S. Fiedelak, M. Niedling et al. „Influence of automotive headlamp systems on the visibility of targets under different road lighting conditions“. In: *Lighting Research & Technology* 64.1 (2022), S. 147715352210942. ISSN: 1477-1535. DOI: 10.1177/14771535221094279.
- [171] S. Völker. „Hell- und Kontrastempfindung-ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern“. Habilitationsschrift. Universität Paderborn, 2006.
- [172] M. Wagner, A. Erkan und T. Q. Khanh. „Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlichen Scheinwerfereinstellungen unter konstanter Straßenbeleuchtung: Lux junior 2021: 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 04. – 06. Juni 2021, Ilmenau : Tagungsband, p. 297“. In: (2021). DOI: 10.22032/dbt.49336.

-
- [173] M. Wagner, A. Erkan, K. Kosmas et al. „Reducing Head Lighting Level on Urban Roads for Different Street Lighting Situations“. In: *13th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Hrsg. von T. Q. Khanh. 2019. ISBN: 978-3-8316-4817-7. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/118645/>.
- [174] M. Wagner und T. Q. Khanh. „Sicher durch die nächtliche Stadt - Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung in der städtischen Straßenbeleuchtung aus Fahrersicht“. In: *Licht* 72.2 (2020), S. 108–113. URL: <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/121204/>.
- [175] M. Wang und N. Debbage. „Urban morphology and traffic congestion: Longitudinal evidence from US cities“. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 89.4 (2021), S. 101676. ISSN: 01989715. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101676.
- [176] Y. Wang, X. Zhu, L. Li et al. „Reasons and Countermeasures of Traffic Congestion under Urban Land Redevelopment“. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 96 (2013), S. 2164–2172. ISSN: 18770428. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.08.244.
- [177] P. O. Wanvik. „Effects of road lighting: an analysis based on Dutch accident statistics 1987-2006“. In: *Accident; analysis and prevention* 41.1 (2009), S. 123–128. DOI: 10.1016/j.aap.2008.10.003.
- [178] R. Weale. „Retinal illumination and age“. In: *Transactions of the Illuminating Engineering Society* (1961).
- [179] E. H. Weber. *Der Tastsinn und das Gemeingefühl*. Hamburg: tredition, 1850. ISBN: 3847268678.
- [180] B. Willeke, C. Hohmann, D. Mundt et al. „HD Technologies: New Functions and Possibilities for Signal Lighting“. In: *Proceedings of the 12th International Symposium on Automotive Lighting*. Hrsg. von T. Q. Khanh. Darmstädter Lichttechnik. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2017, S. 349–356. ISBN: 978-3-8316-4671-5.
- [181] B. Wördenweber, R. Lachmayer und U. Witt. „Intelligente Frontbeleuchtung“. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 98.10 (1996), S. 546–551.
- [182] Worldbank. *World Development Indicators | DataBank*. 1.01.2016. URL: <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=world-development-indicators>.
- [183] M. Zalesińska. „Visibility concept in road lighting“. In: *Light in Engineering, Architecture and the Environment*. Hrsg. von K. Domke und C. A. Brebbia. WIT Transactions on the Built Environment. WIT PressSouthampton, UK, 2011, S. 159–170. DOI: 10.2495/LIGHT110141.
- [184] B. Zydek. „Blendungsbewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern unter dynamischen Bedingungen“. Diss. Darmstadt: Technische Universität, 2014.

A. Anhang

A.1. Leuchtdichte-, Kontrast- und Visibility Level-Verläufe der Studie zur Detektion außerorts im Lichtkanal

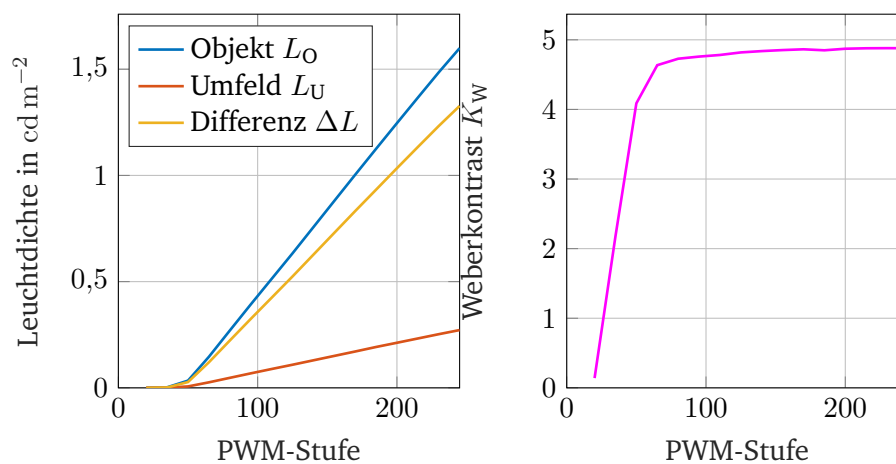


Abbildung A.1.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 2 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

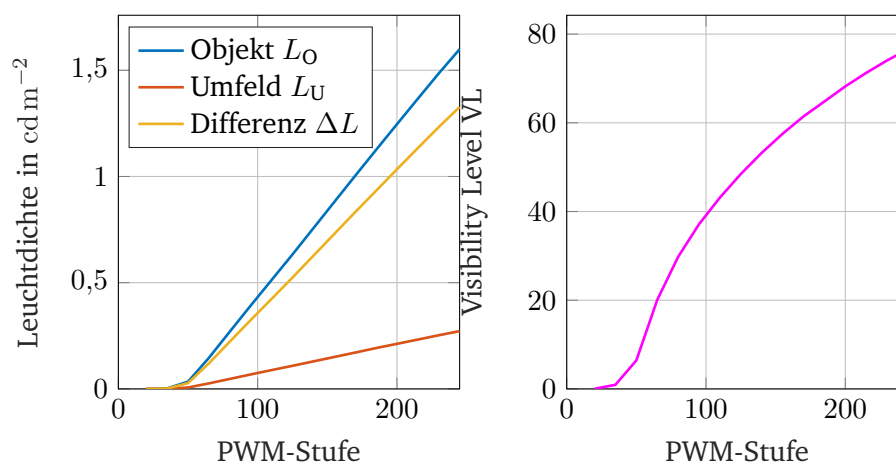


Abbildung A.2.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 2 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

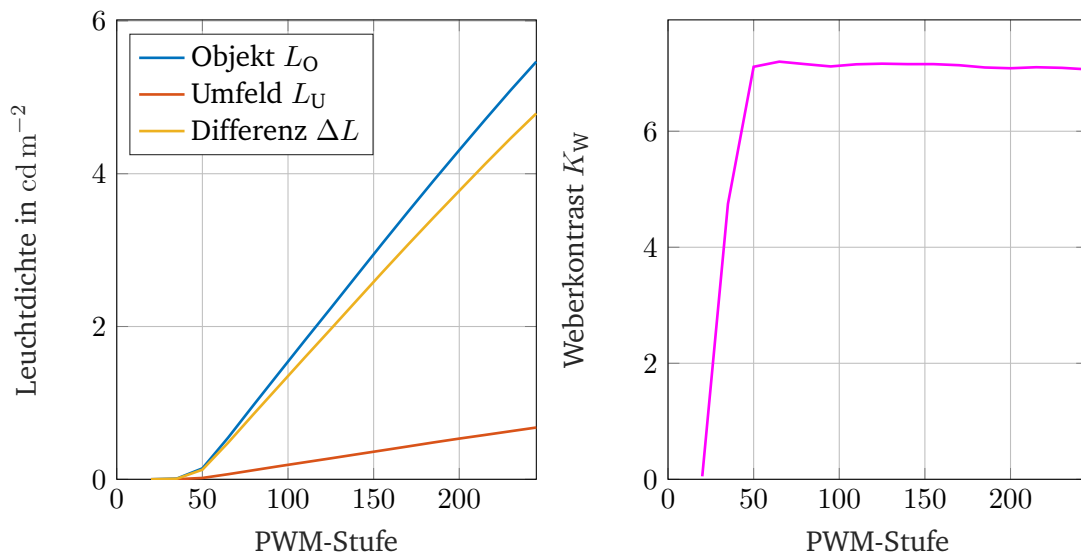


Abbildung A.3.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 3 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

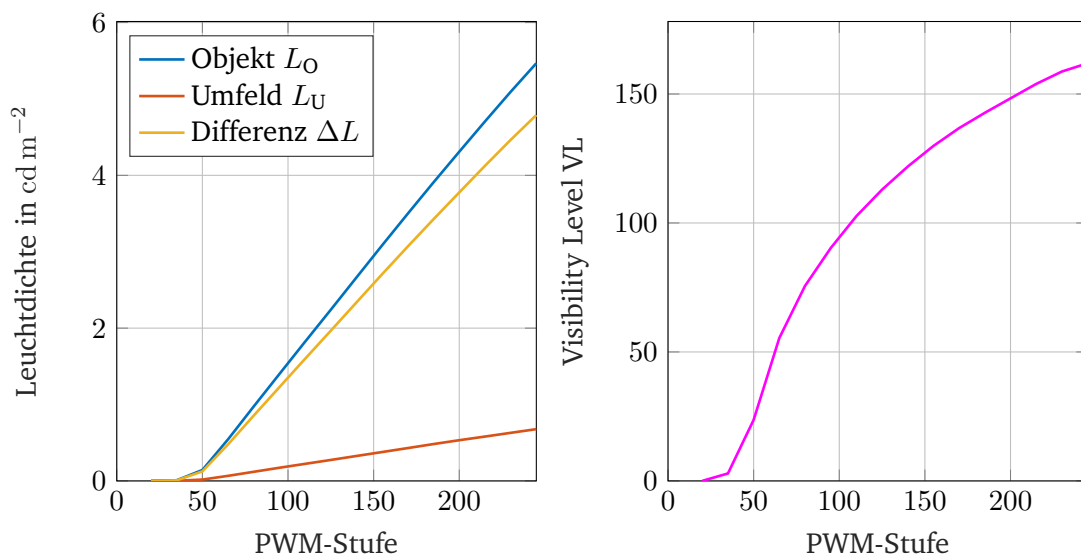


Abbildung A.4.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 3 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

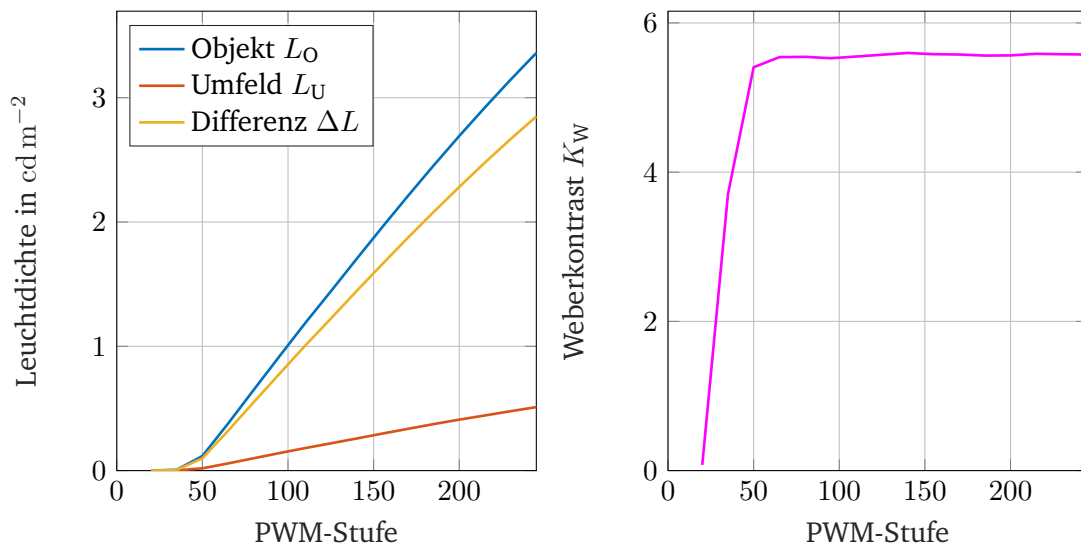


Abbildung A.5.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 4 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfundleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

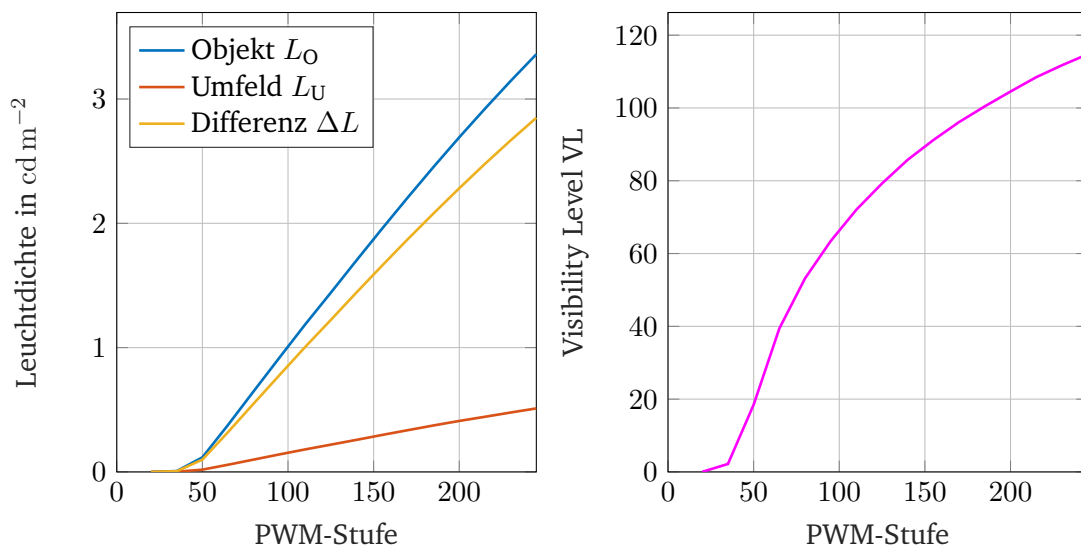


Abbildung A.6.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 4 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

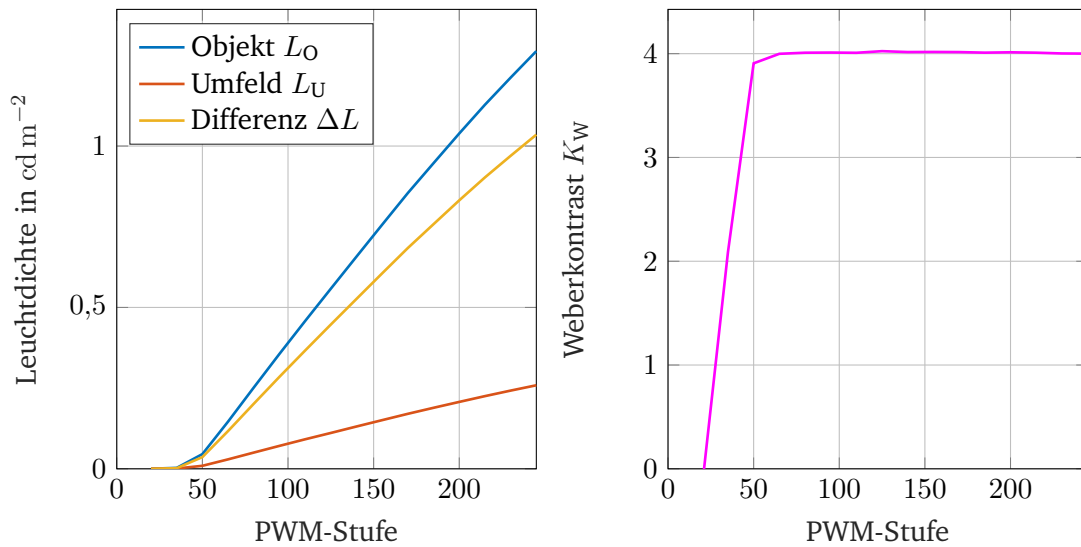


Abbildung A.7.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 5 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldeleuchtichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

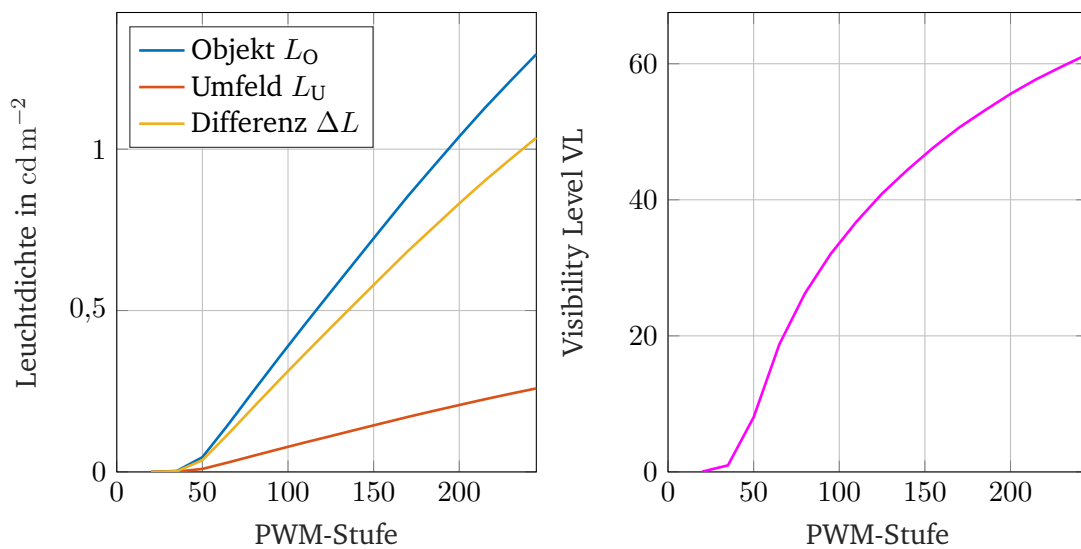


Abbildung A.8.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 5 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

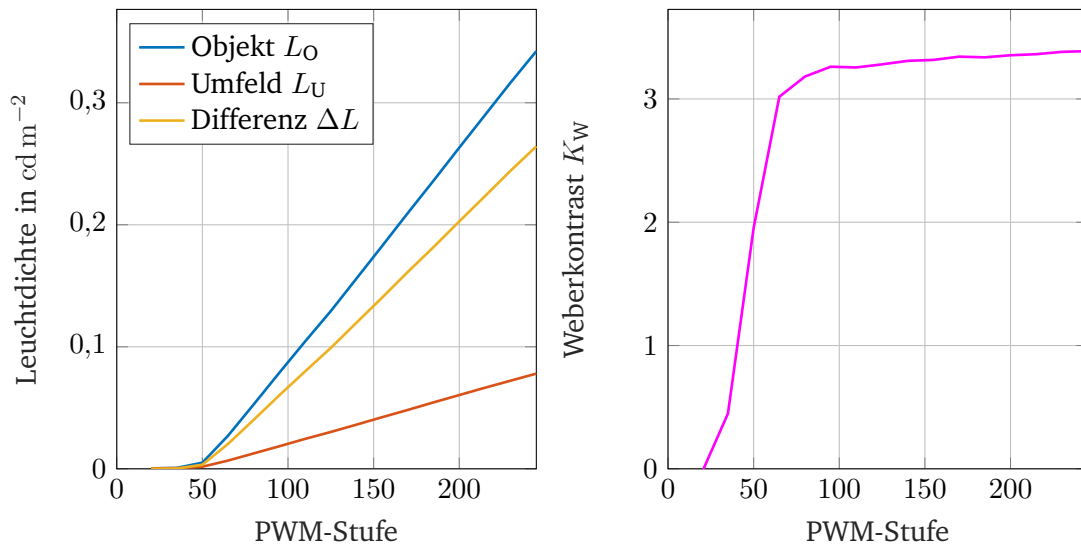


Abbildung A.9.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 6 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfelddleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

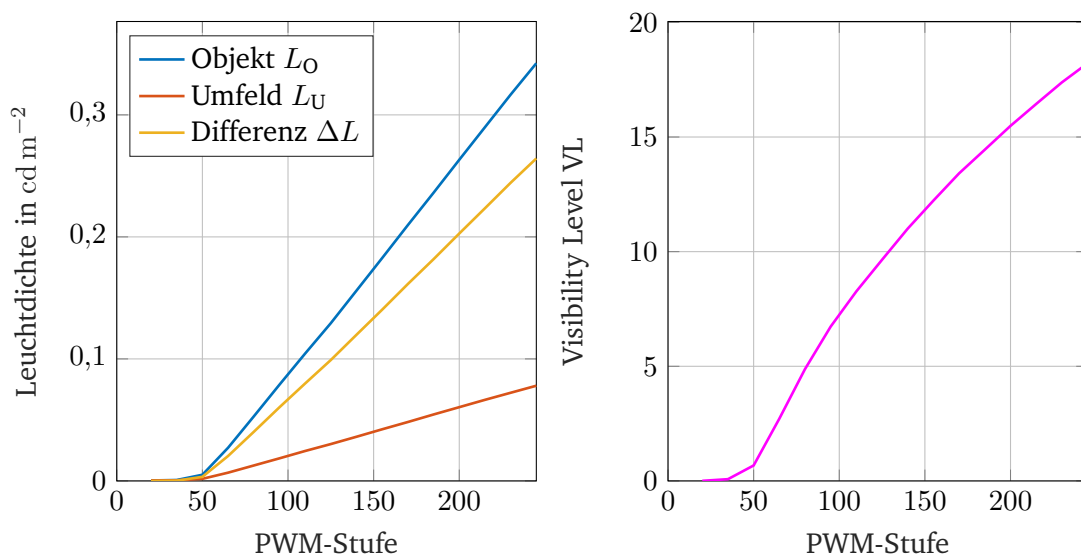


Abbildung A.10.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 6 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

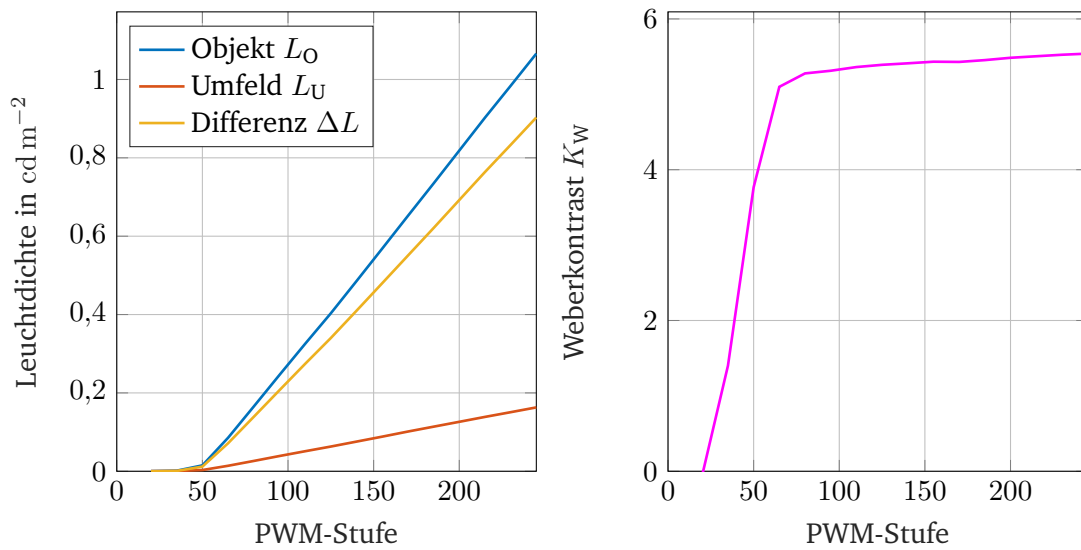


Abbildung A.11.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 7 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

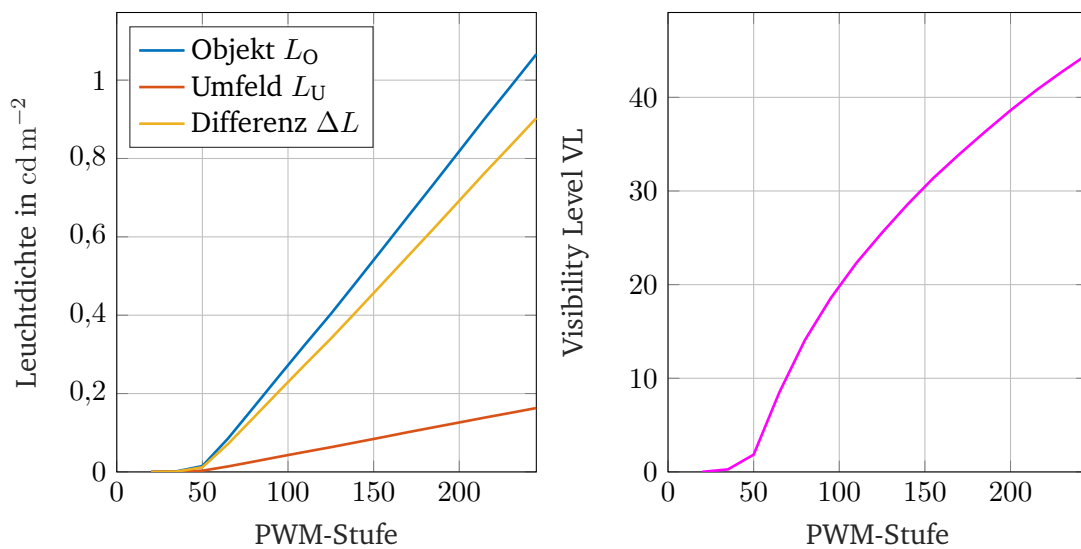


Abbildung A.12.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 7 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

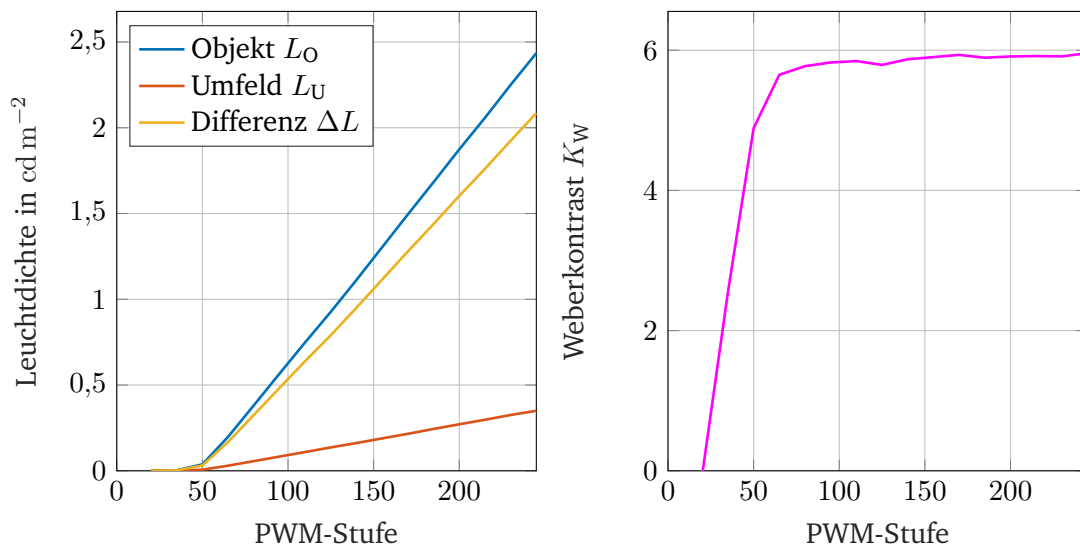


Abbildung A.13.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 8 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

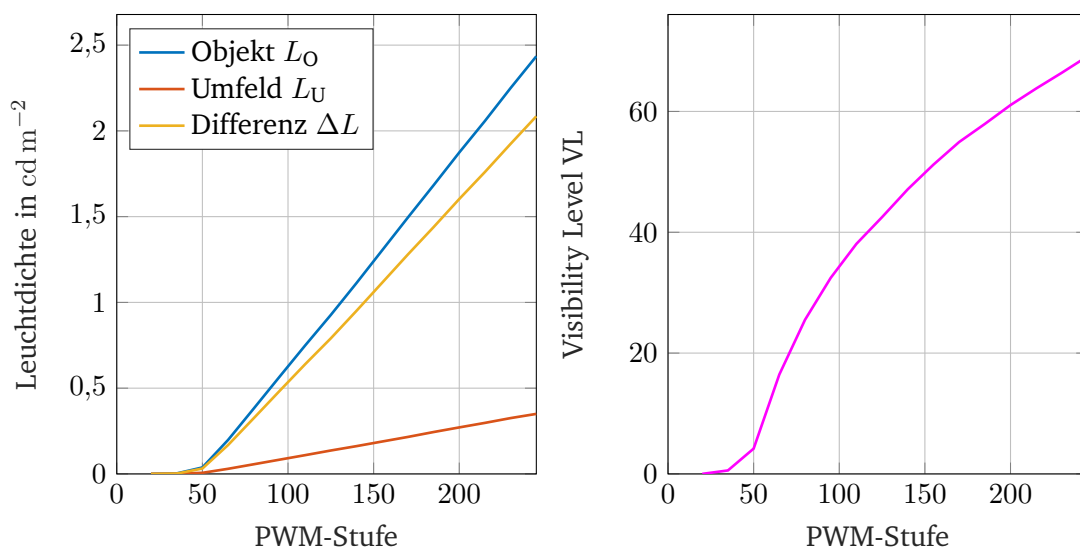


Abbildung A.14.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 8 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

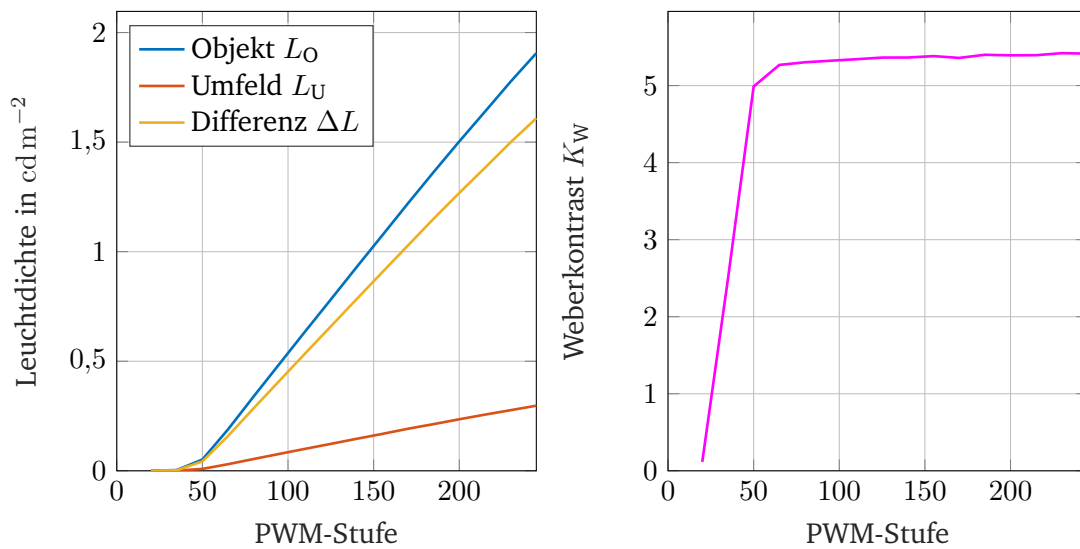


Abbildung A.15.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 9 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

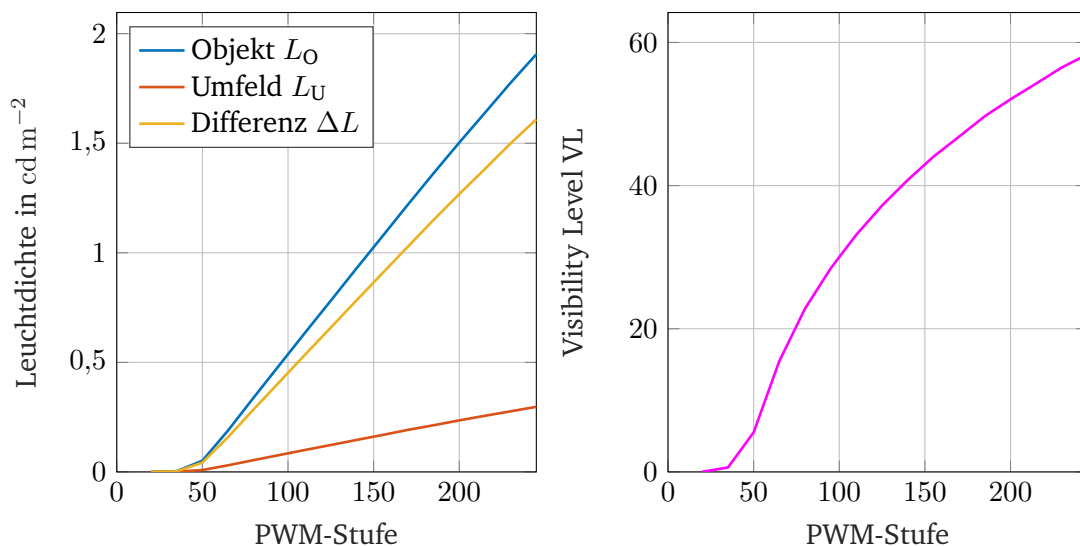


Abbildung A.16.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 9 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

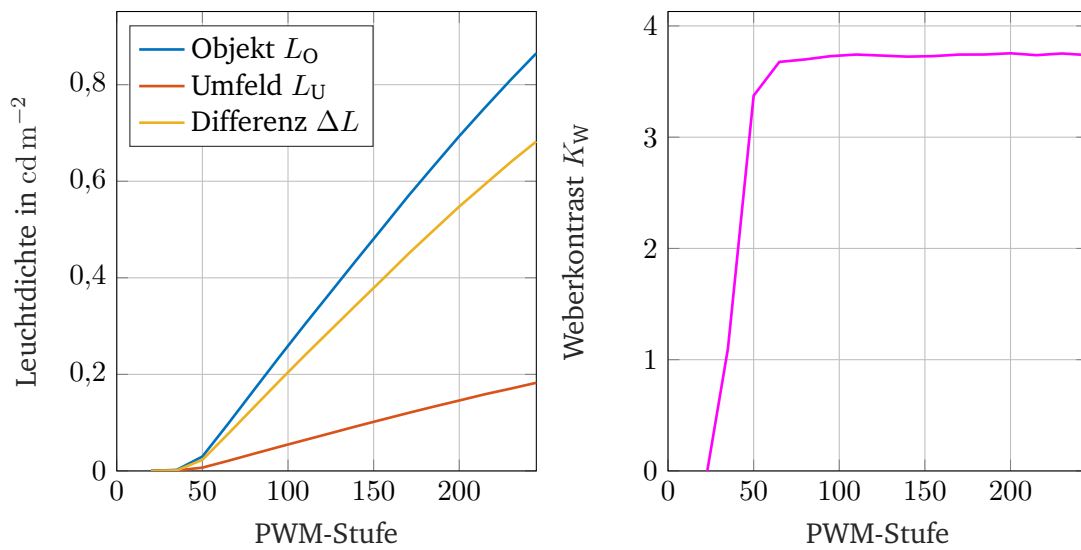


Abbildung A.17.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 10 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

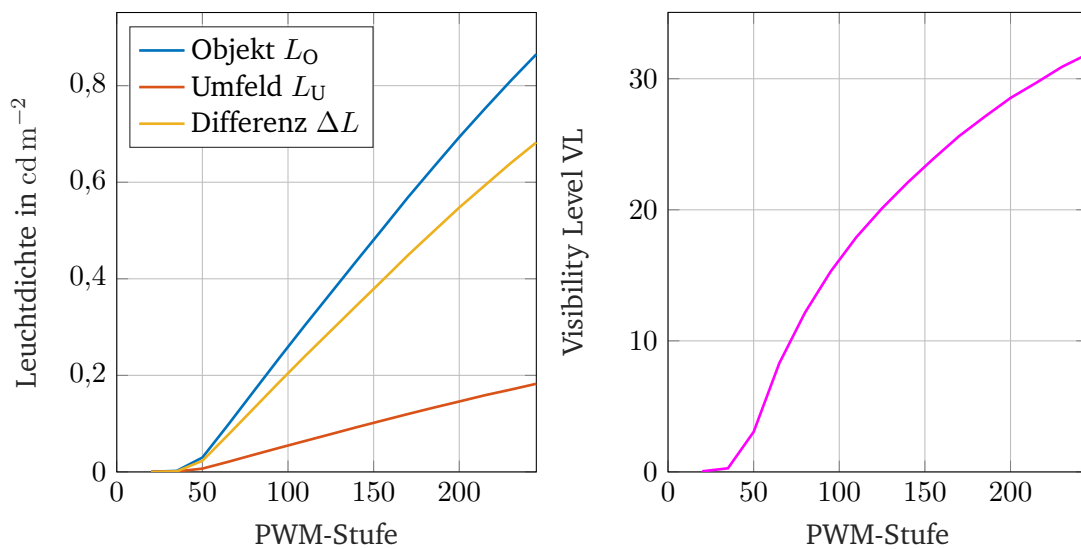


Abbildung A.18.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 10 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

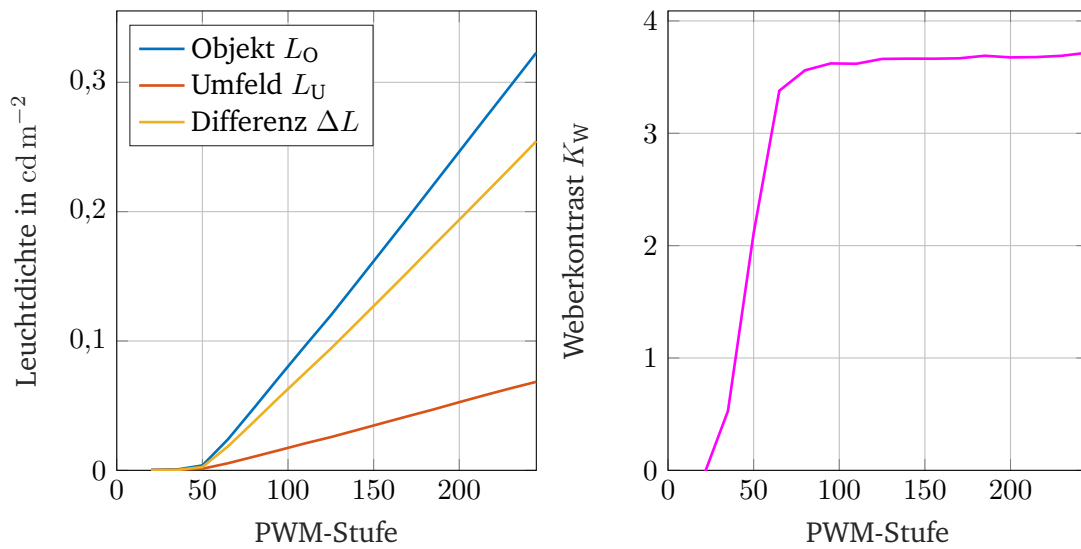


Abbildung A.19.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 11 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

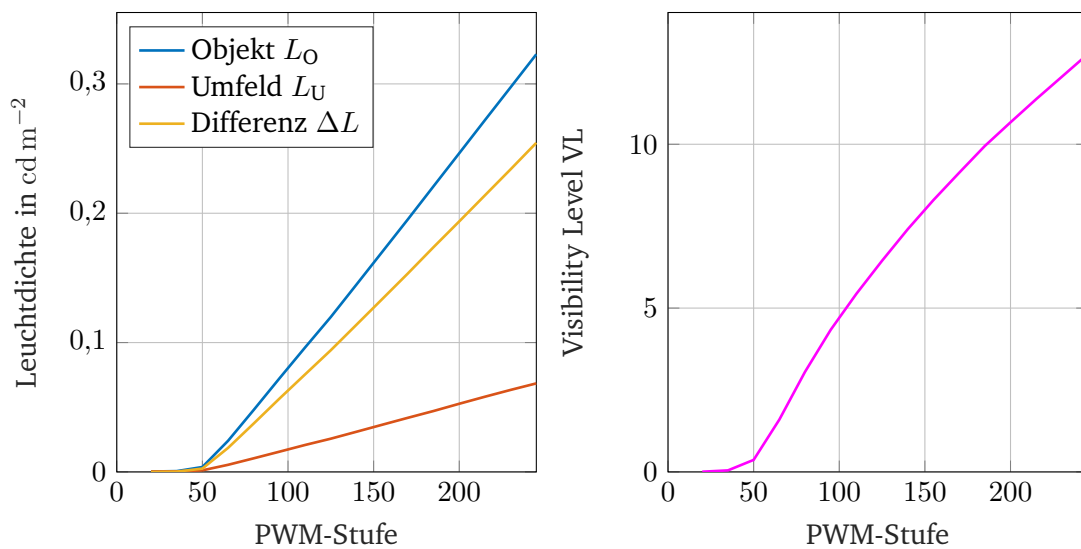


Abbildung A.20.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 11 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

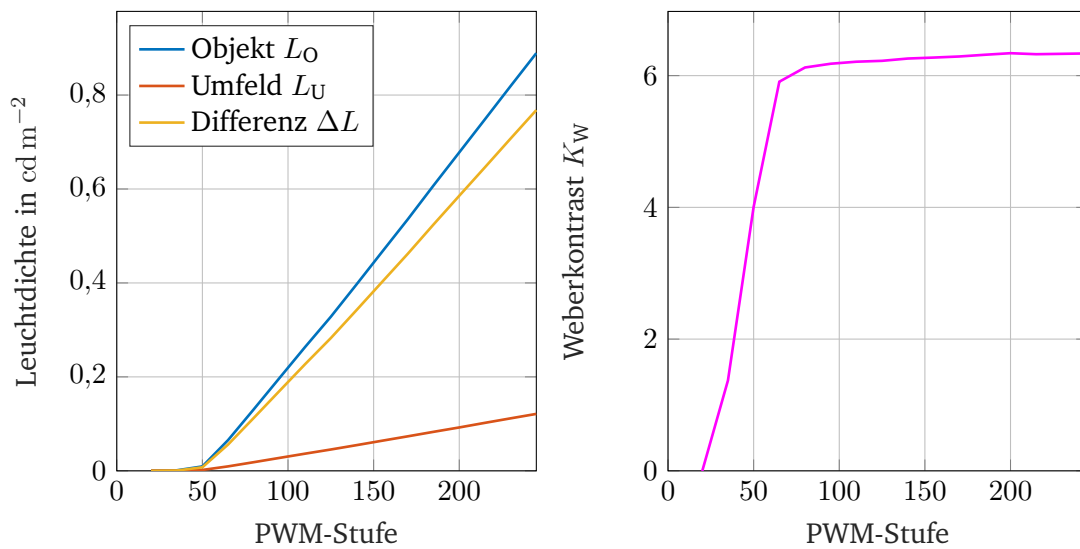


Abbildung A.21.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 12 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

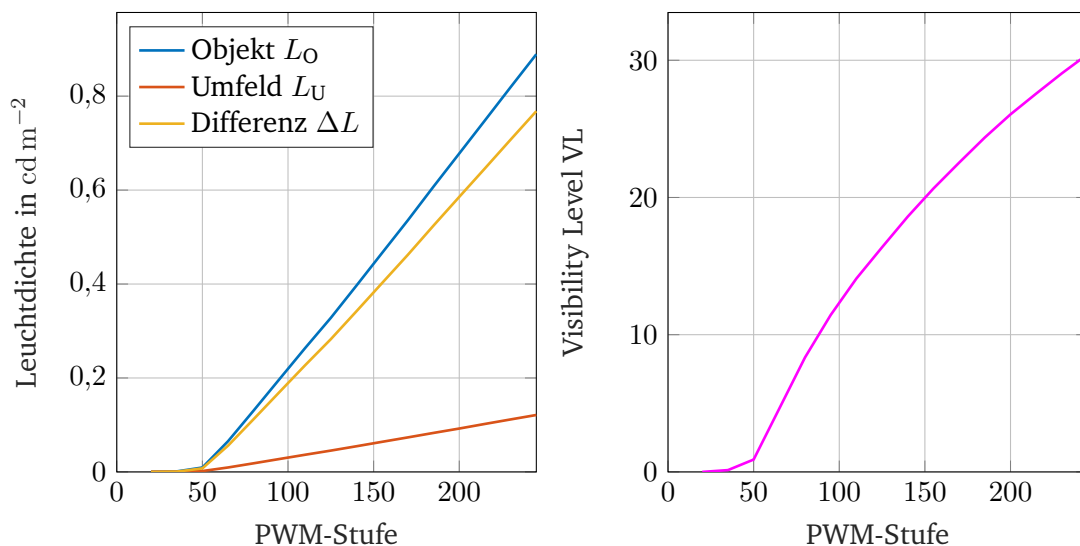


Abbildung A.22.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 12 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

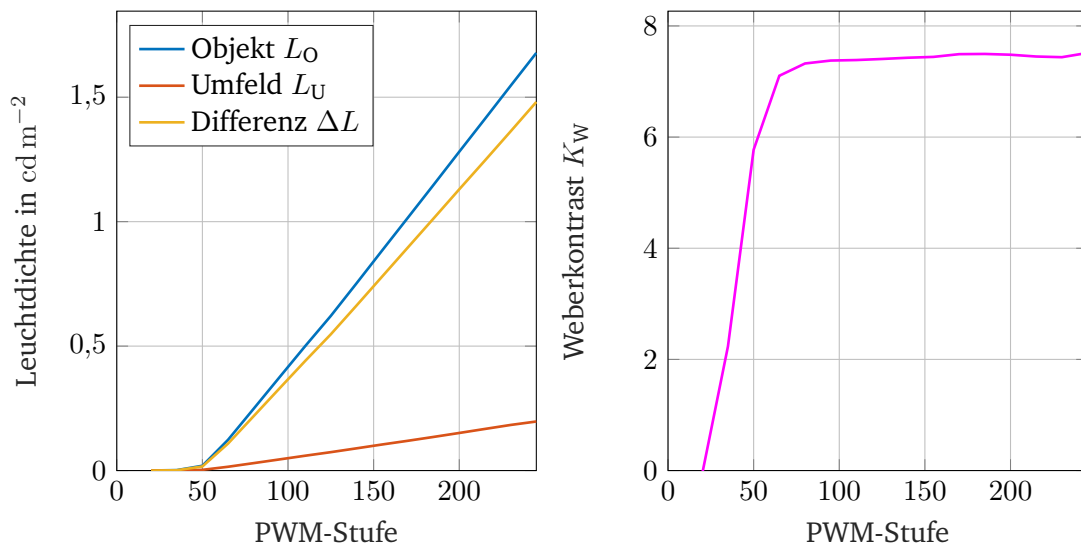


Abbildung A.23.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 13 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

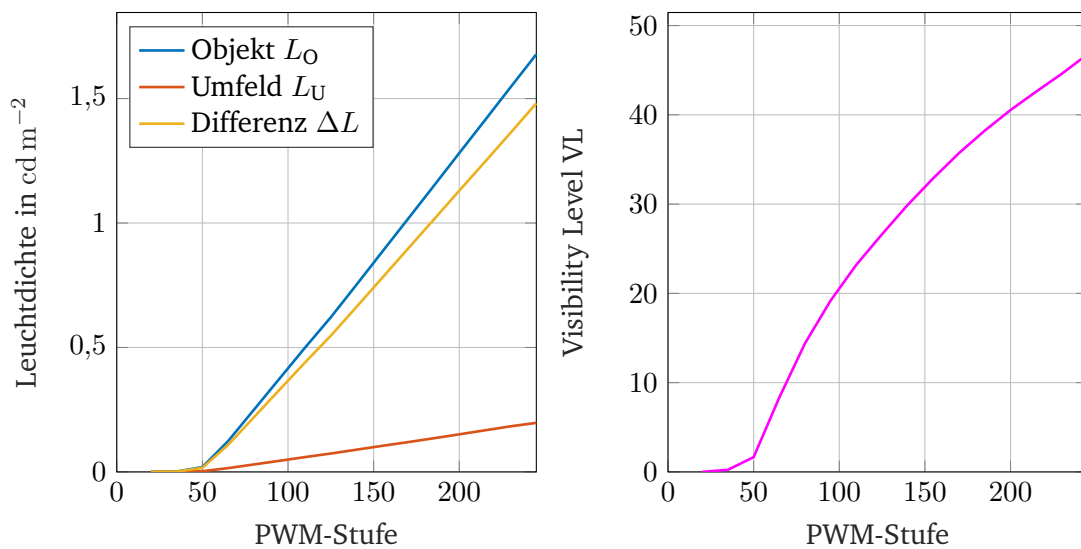


Abbildung A.24.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 13 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

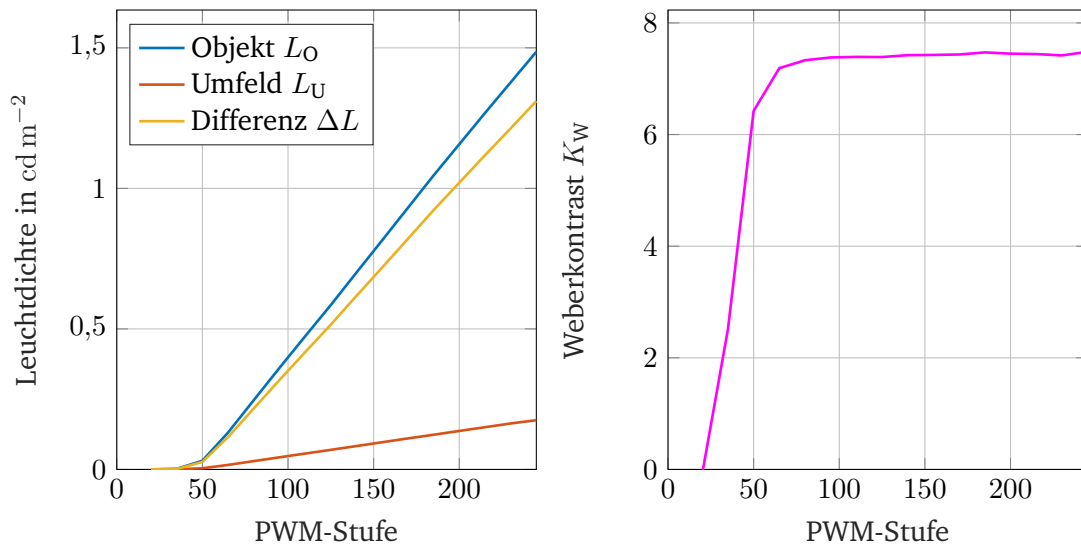


Abbildung A.25.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 14 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

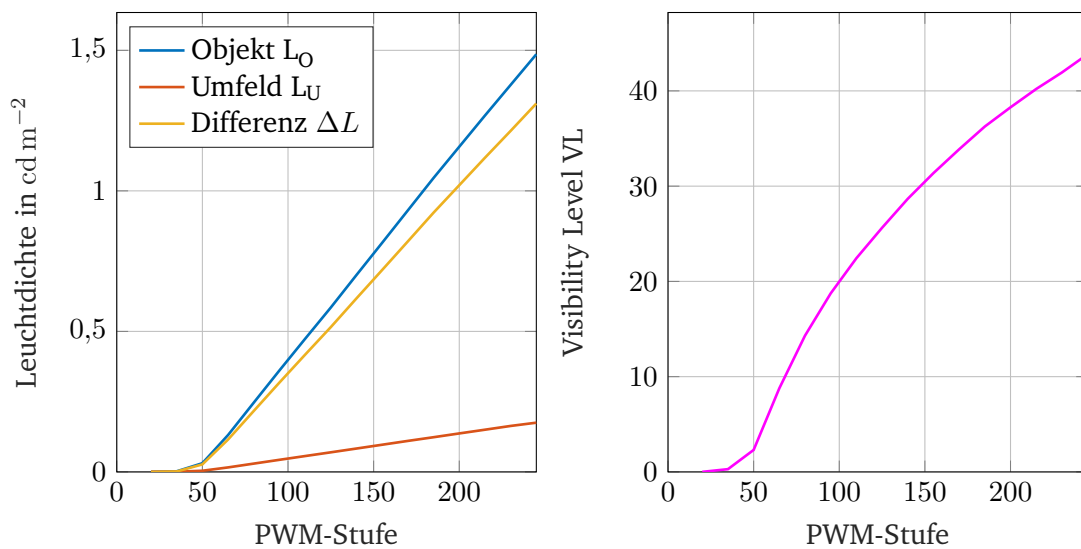


Abbildung A.26.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 14 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

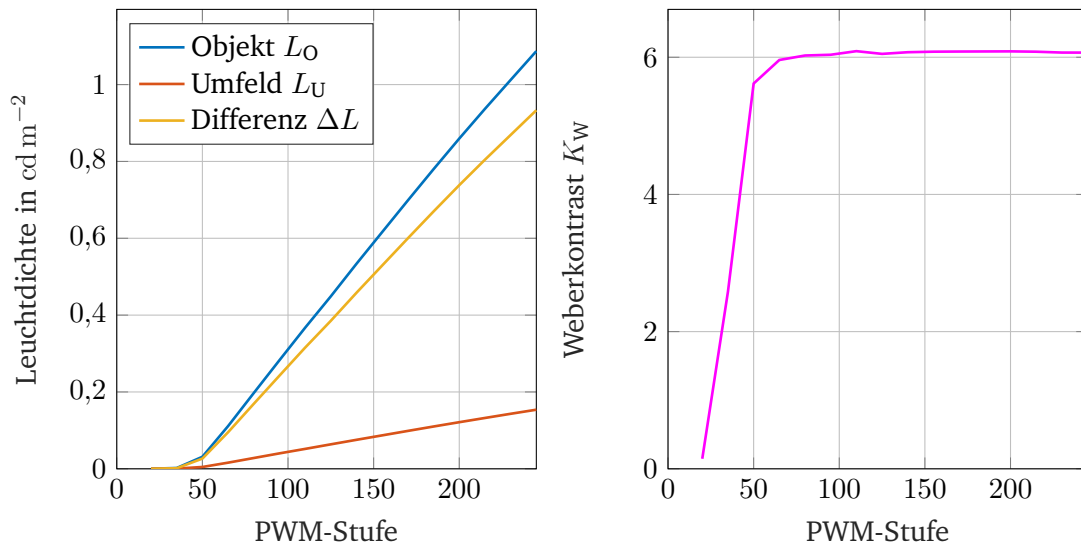


Abbildung A.27.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 15 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

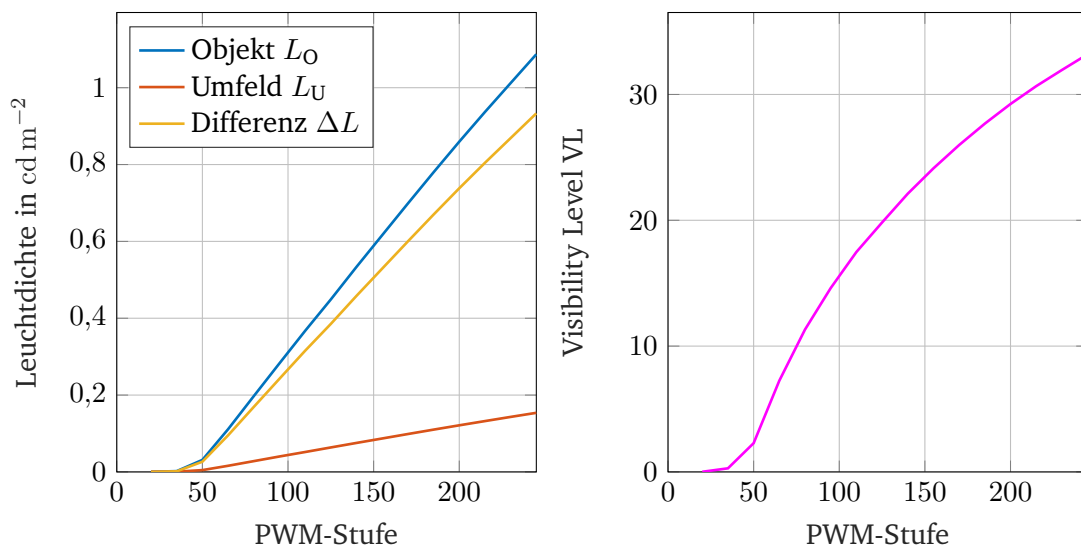


Abbildung A.28.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 15 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

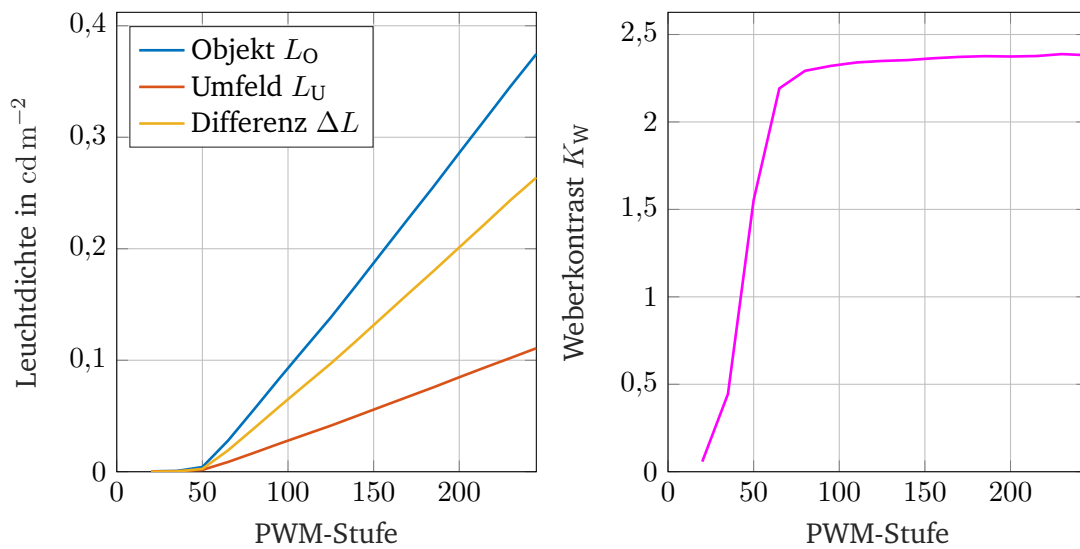


Abbildung A.29.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 16 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfelddleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

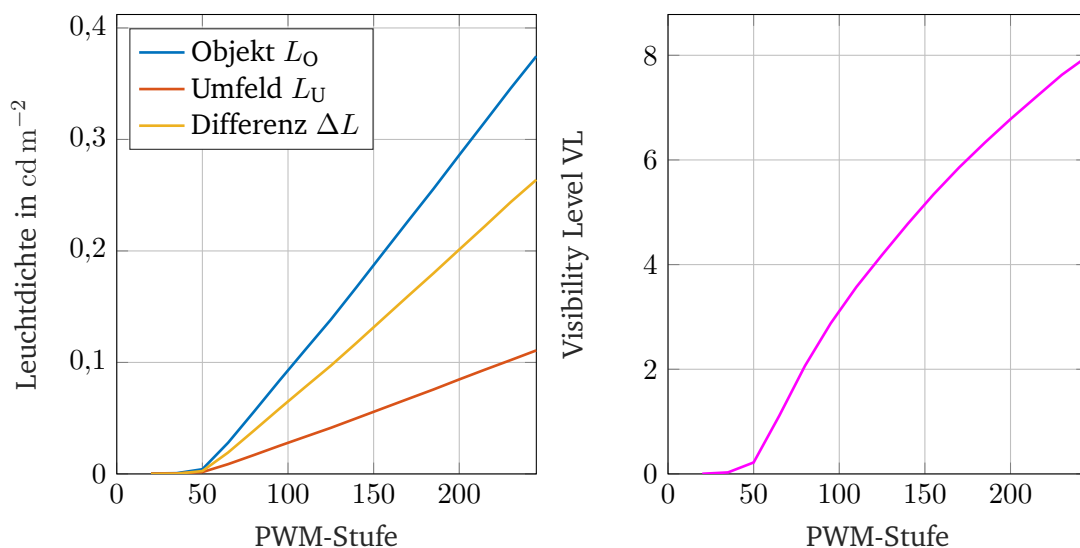


Abbildung A.30.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 16 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

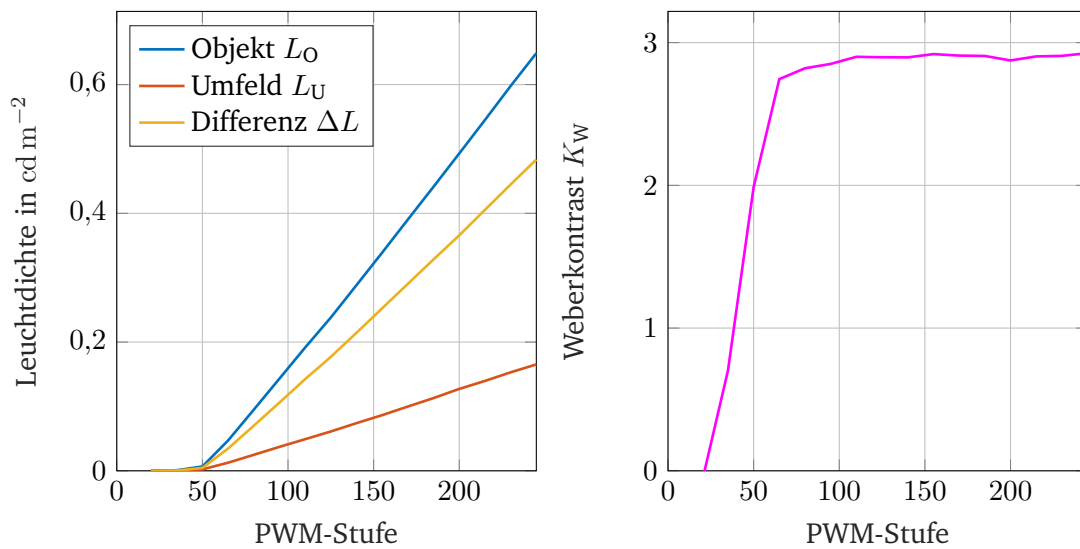


Abbildung A.31.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 17 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

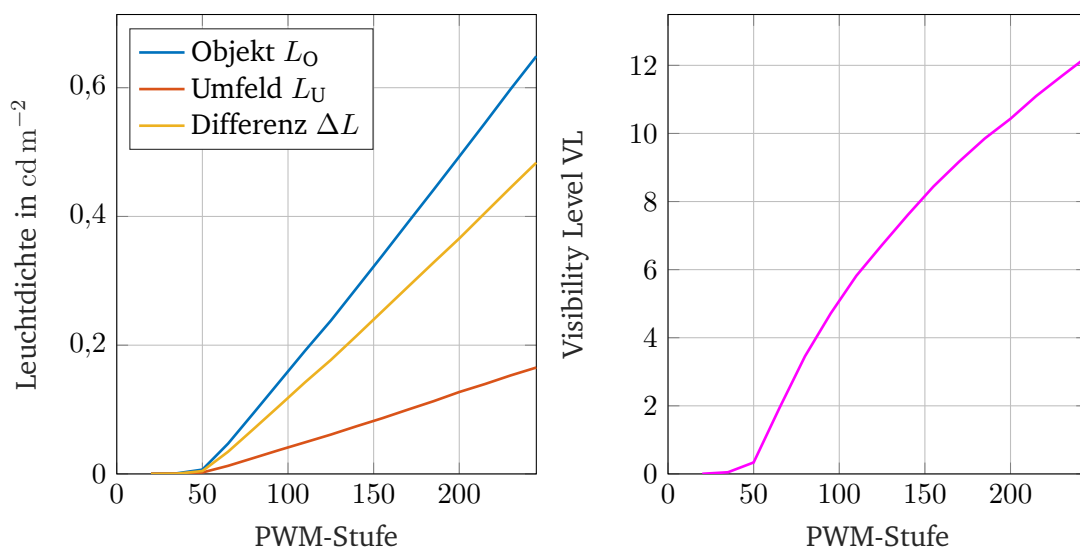


Abbildung A.32.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 17 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

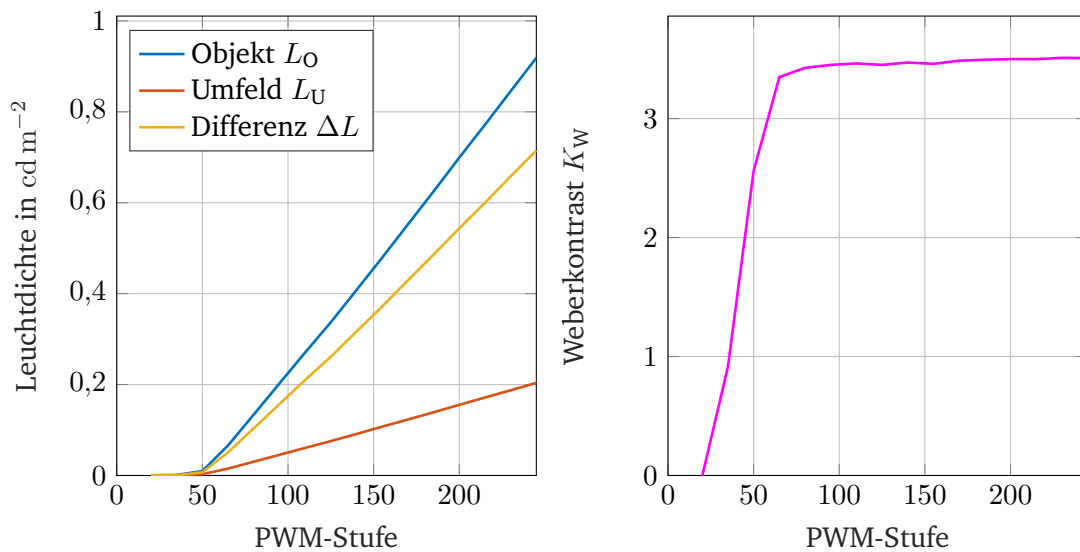


Abbildung A.33.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 18 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

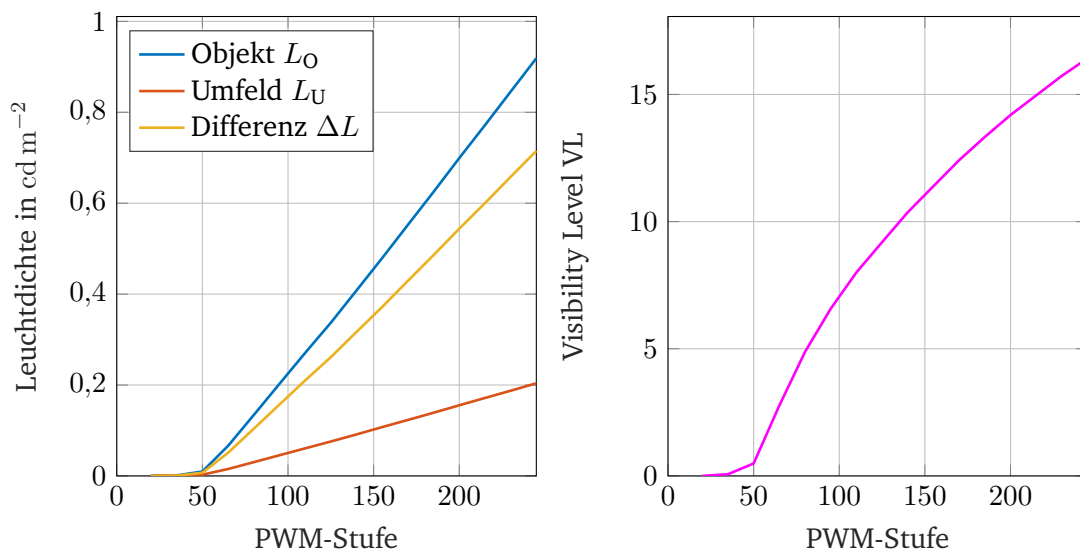


Abbildung A.34.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 18 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

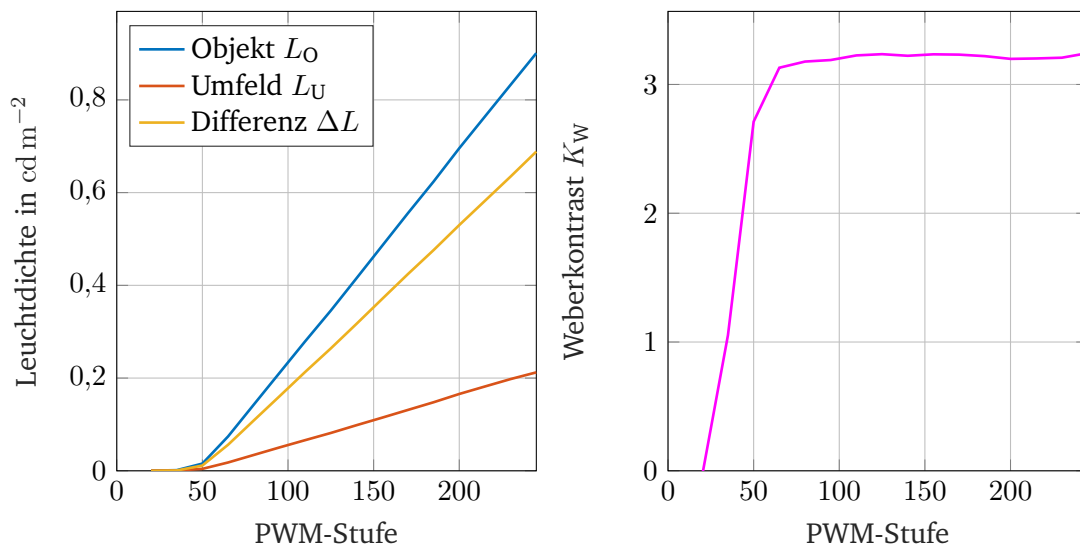


Abbildung A.35.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 19 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

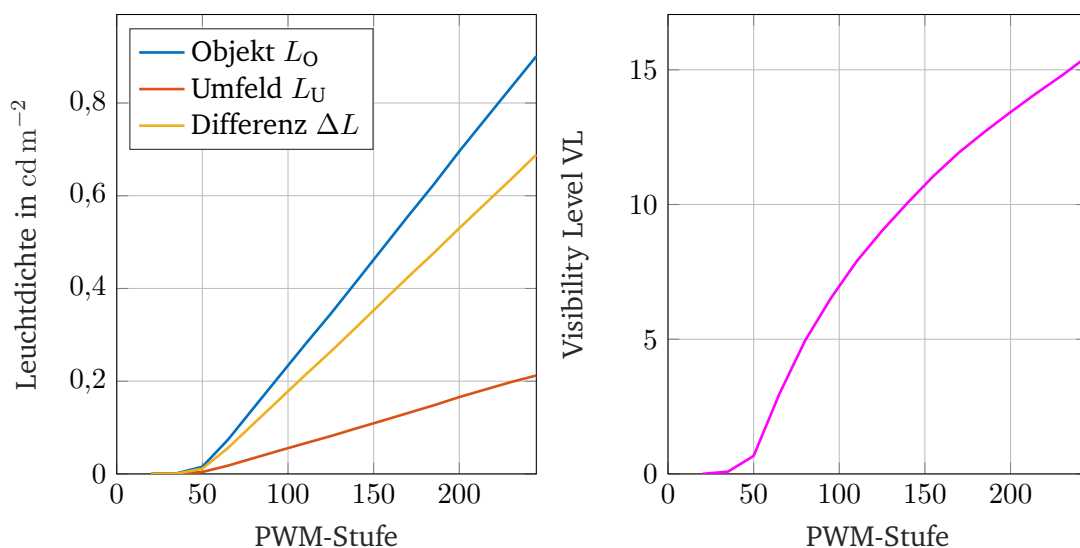


Abbildung A.36.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 19 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

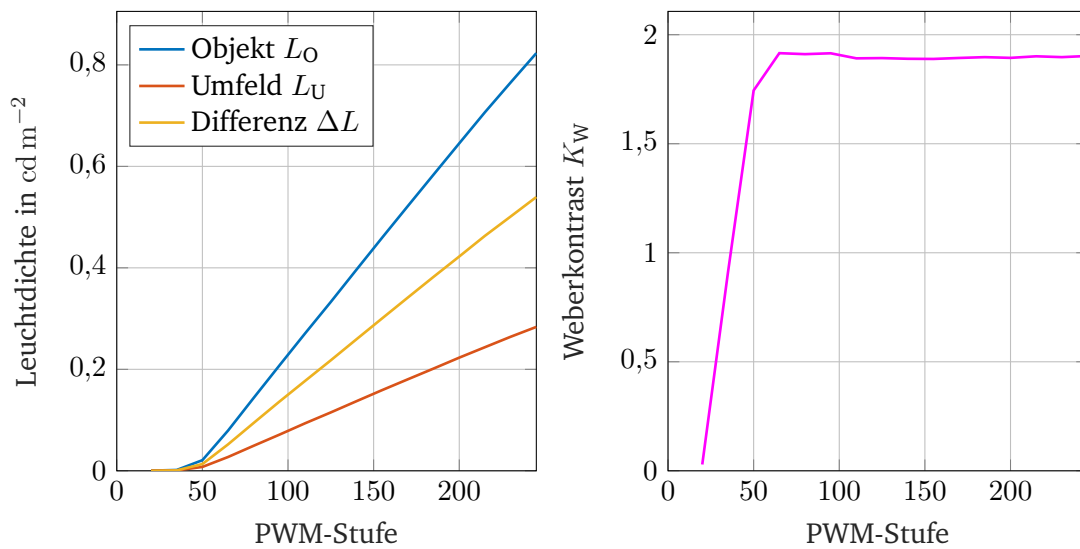


Abbildung A.37.: Leuchtdichten L (links) und Weberkontrast K_W (rechts) der Graukarte auf Objektposition 20 im Lichtkanal; aufgrund des linearen Anstiegs der Leuchtdichtedifferenz ΔL und der Umfeldleuchtdichte L_U geht der Kontrastverlauf in Sättigung.

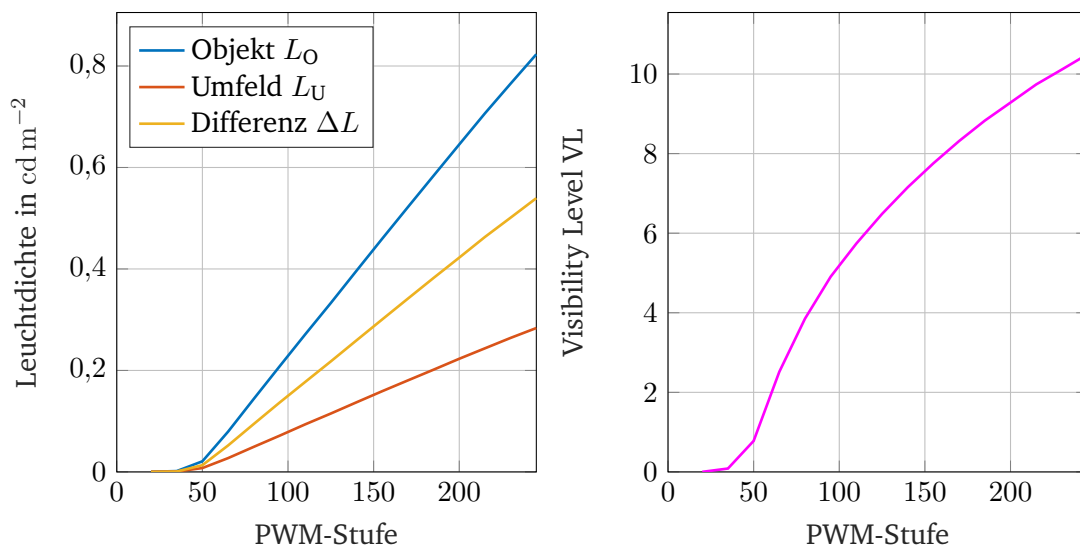


Abbildung A.38.: Leuchtdichten L (links) und Visibility Level VL (rechts) der Graukarte auf Objektposition 20 im Lichtkanal; sowohl die Leuchtdichte als auch das Visibility Level VL steigt mit höheren PWM-Stufen.

A.2. Zusammenhang zwischen Visibility Level und Objektdetektionswahrscheinlichkeit außerorts im Lichtkanal

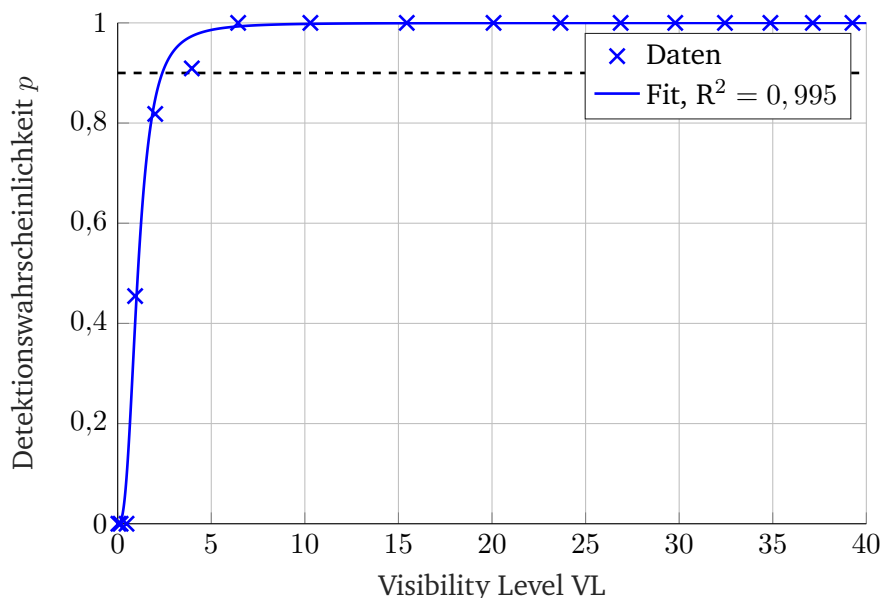


Abbildung A.39.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 2 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 2,384 benötigt.

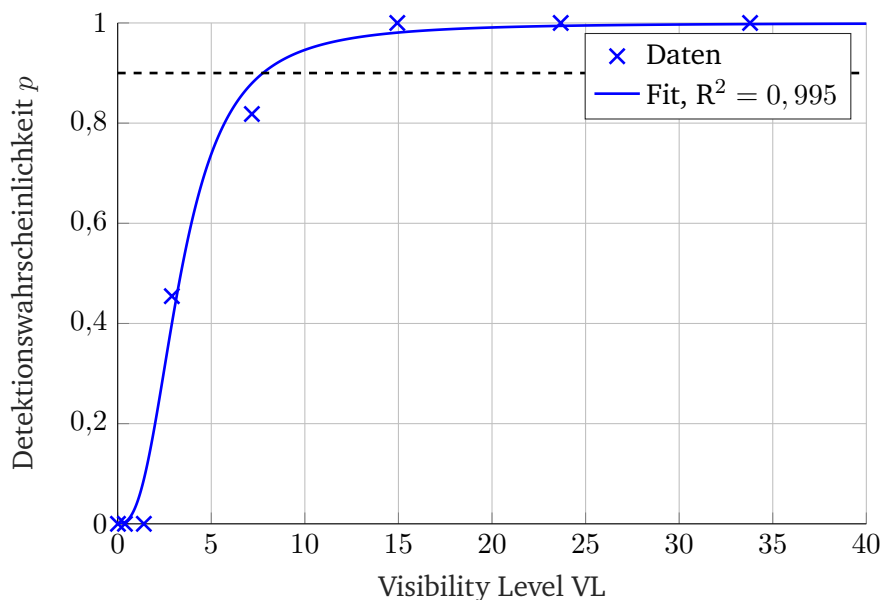


Abbildung A.40.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 3 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 7,760 benötigt.

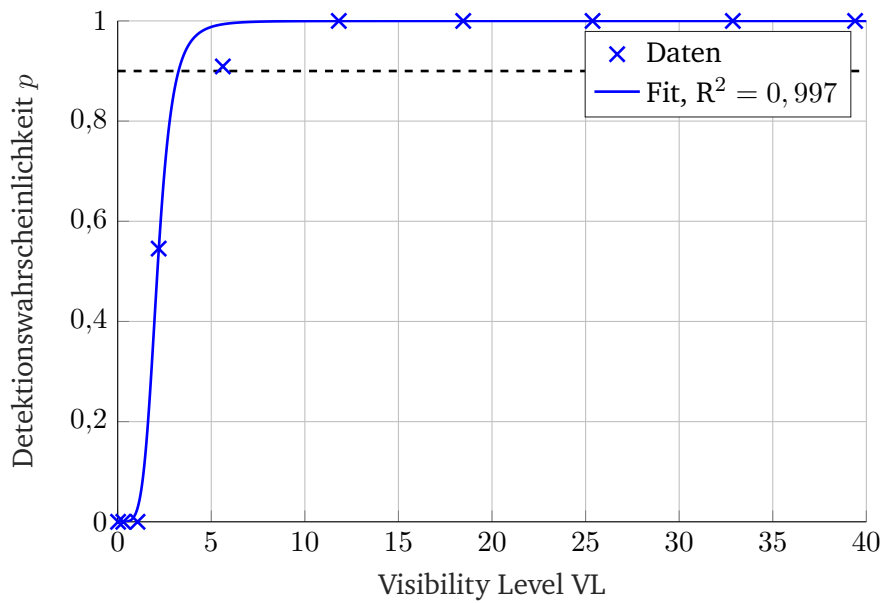


Abbildung A.41.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 4 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 3,252 benötigt.

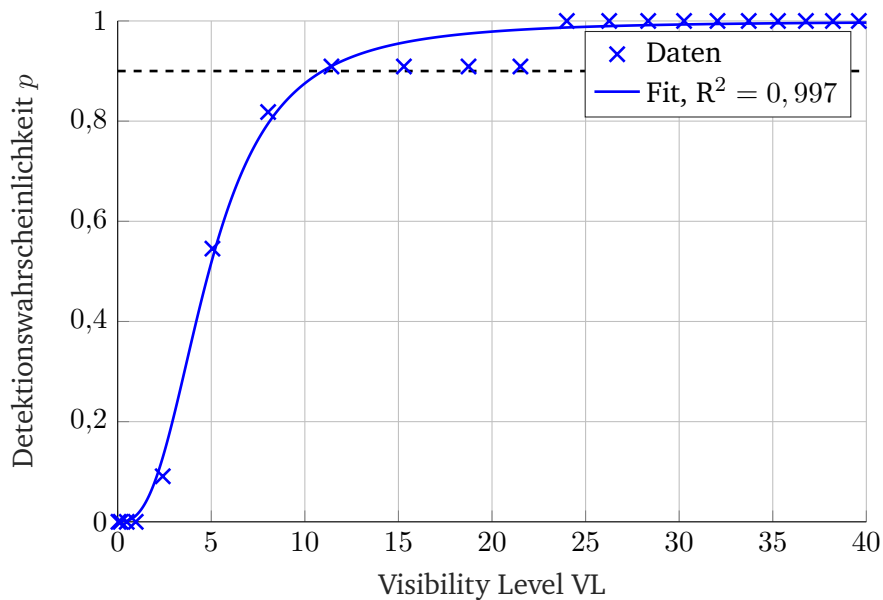


Abbildung A.42.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 5 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 10,955 benötigt.

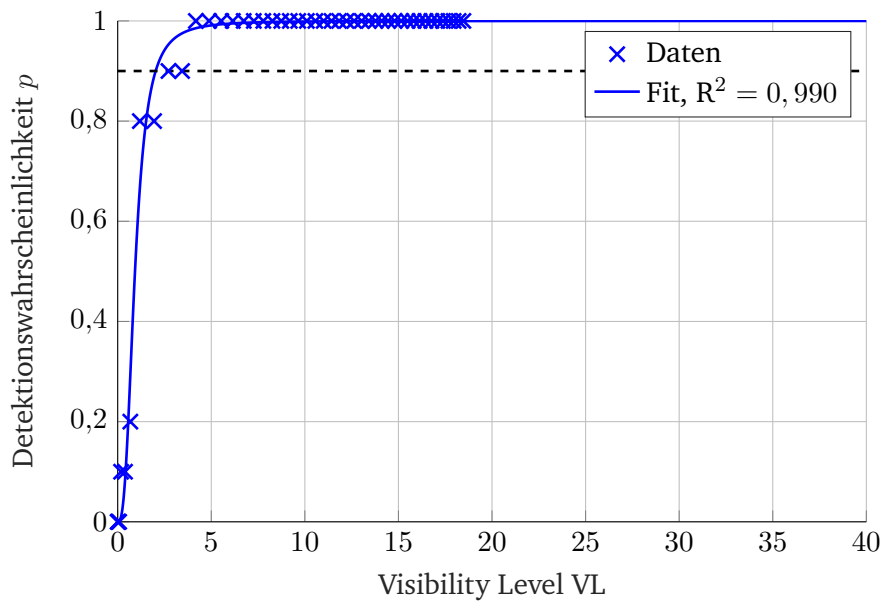


Abbildung A.43.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 6 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 2,029 benötigt.

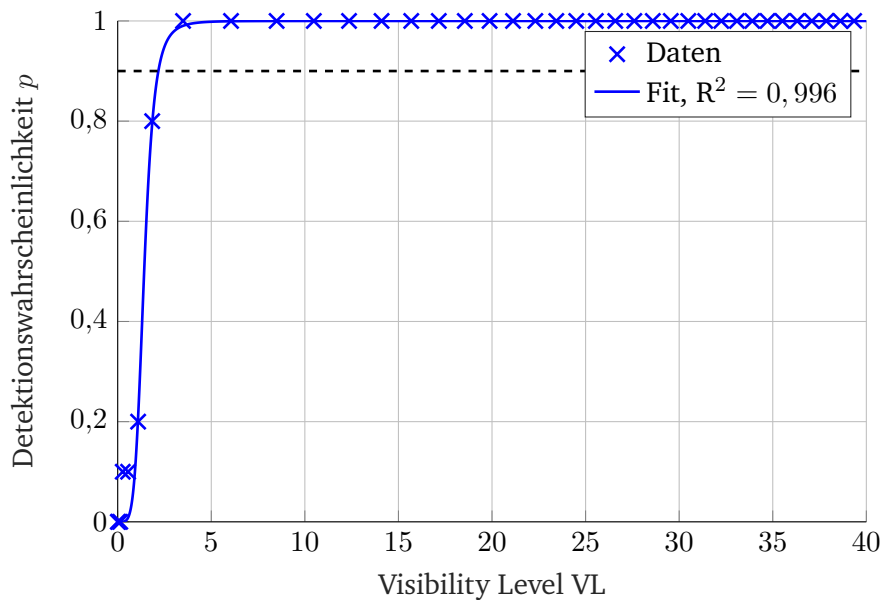


Abbildung A.44.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 7 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 2,173 benötigt.

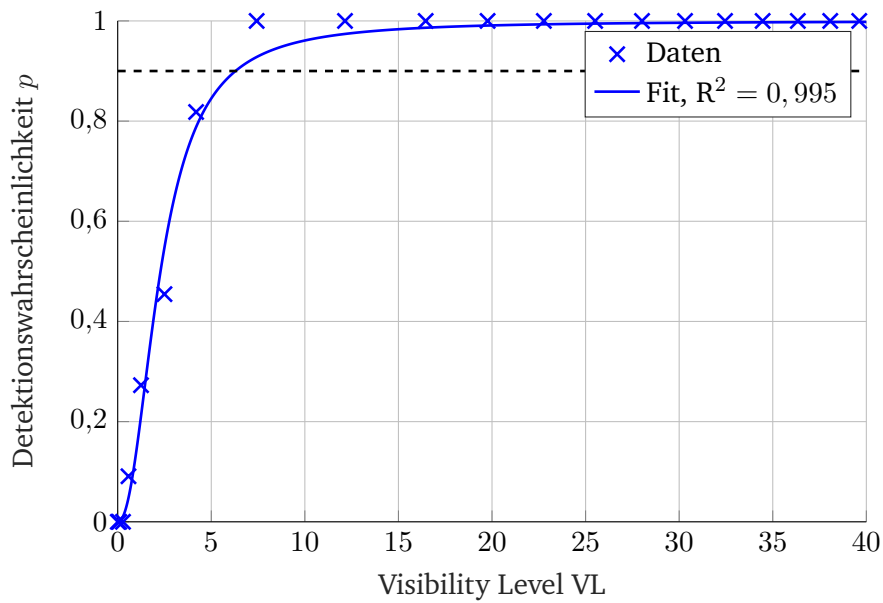


Abbildung A.45.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 8 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 6,295 benötigt.

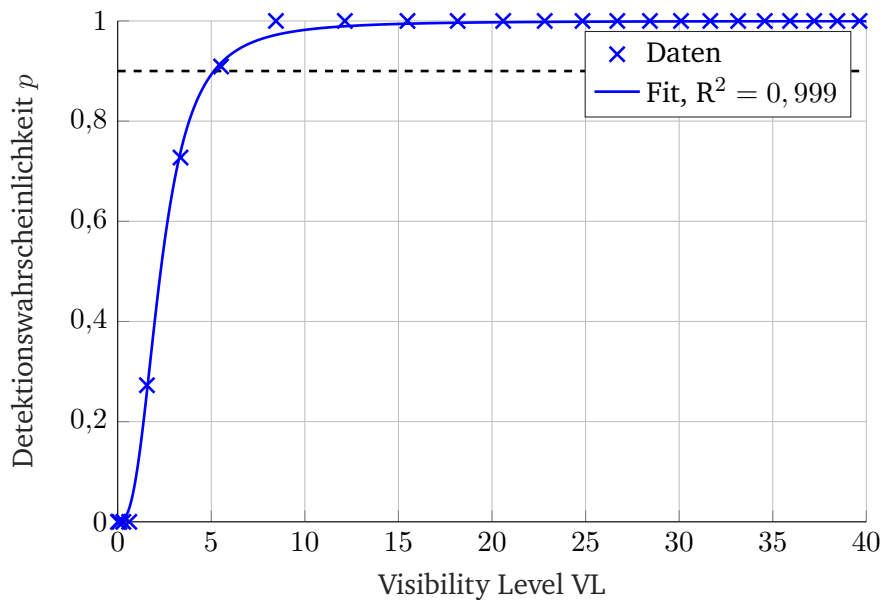


Abbildung A.46.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 9 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 5,140 benötigt.

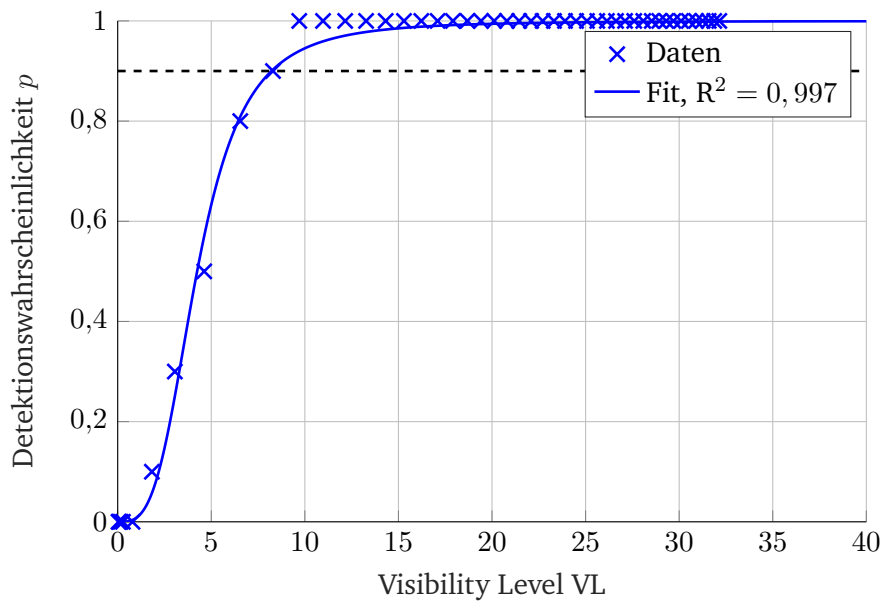


Abbildung A.47.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 10 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 8,220 benötigt.

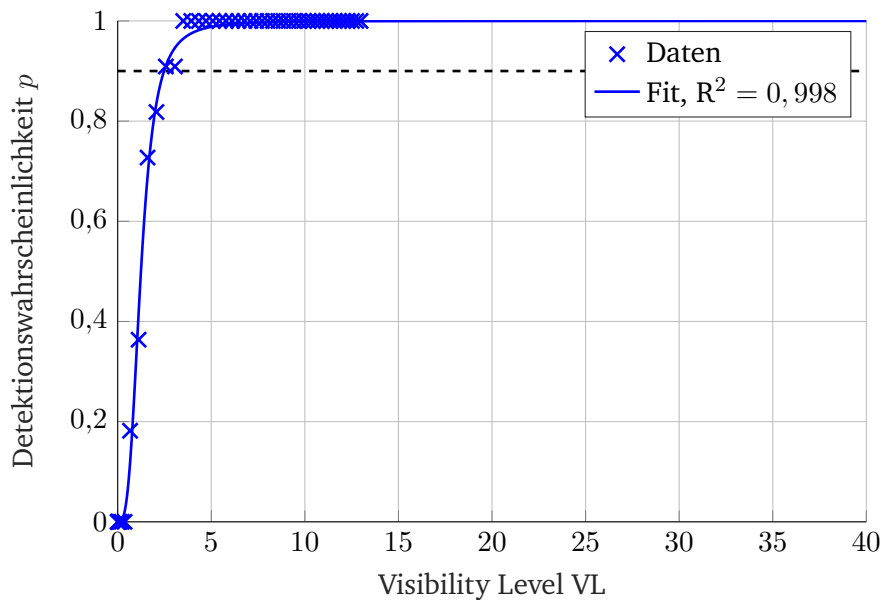


Abbildung A.48.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 11 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 2,480 benötigt.

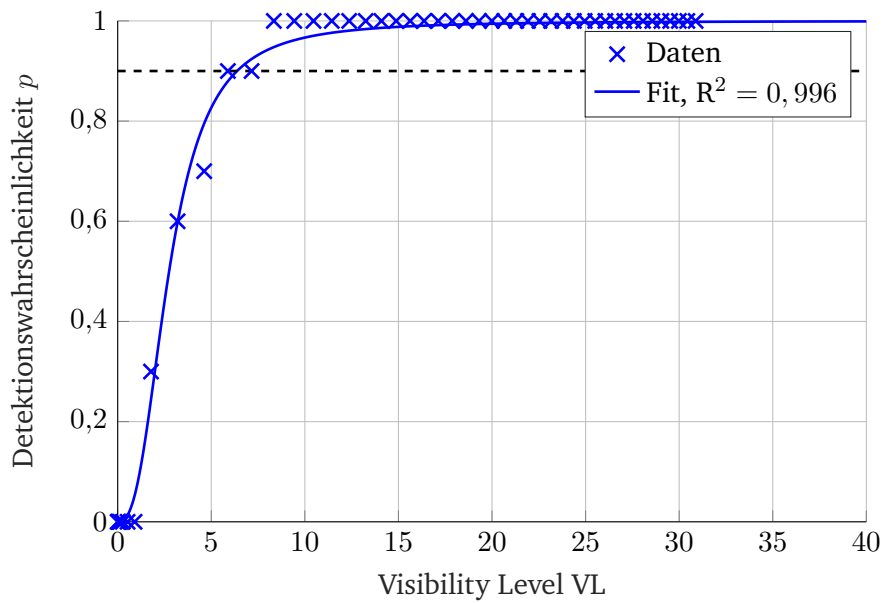


Abbildung A.49.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 12 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 6,380 benötigt.

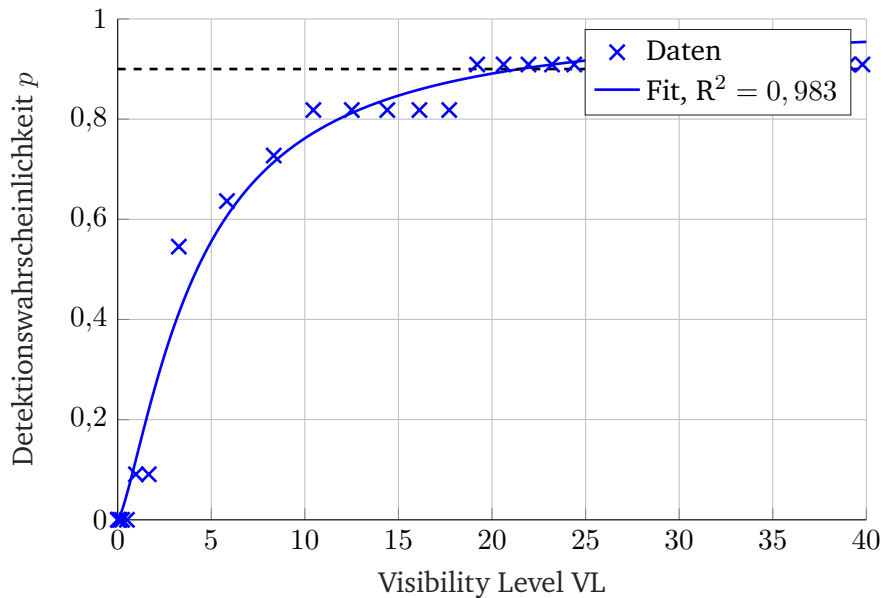


Abbildung A.50.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 13 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 21,500 benötigt.

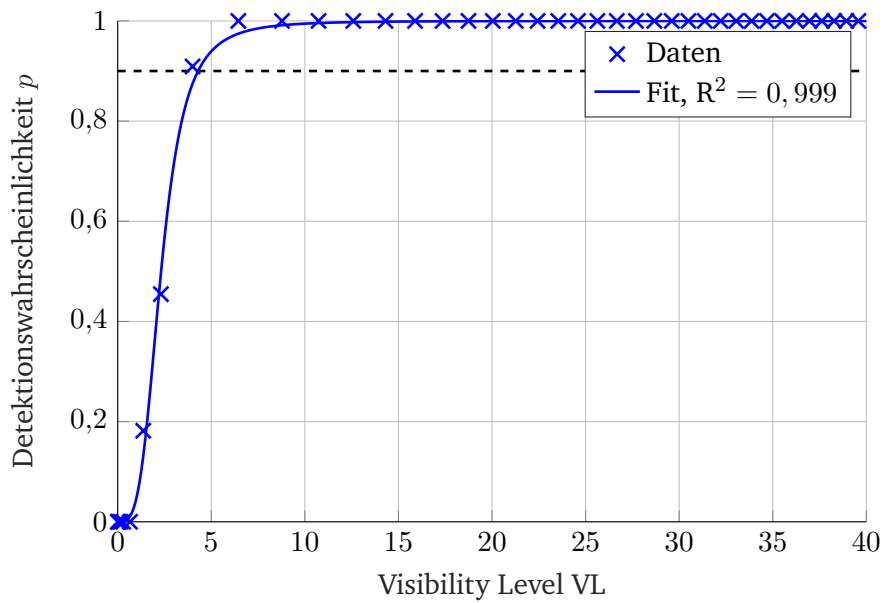


Abbildung A.51.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 14 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 4,300 benötigt.

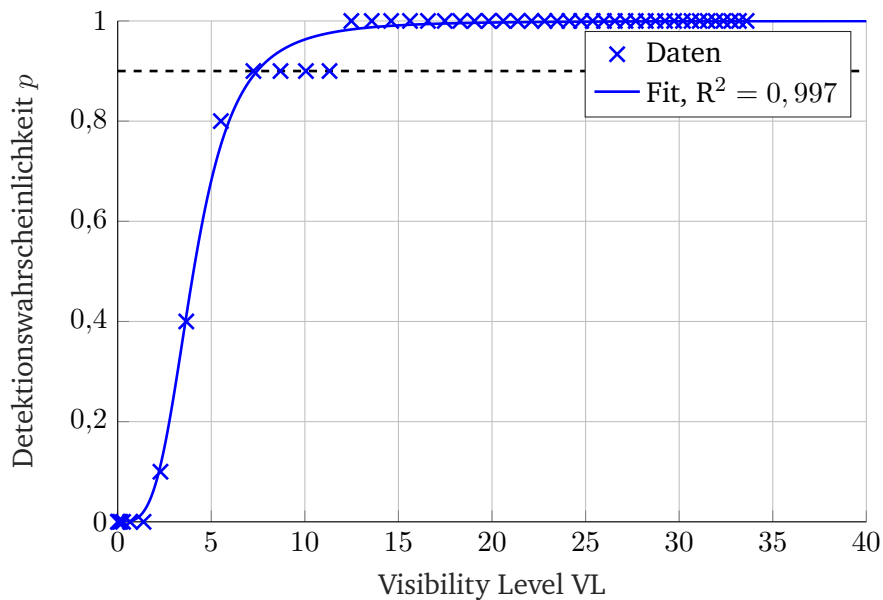


Abbildung A.52.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 15 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 7,450 benötigt.

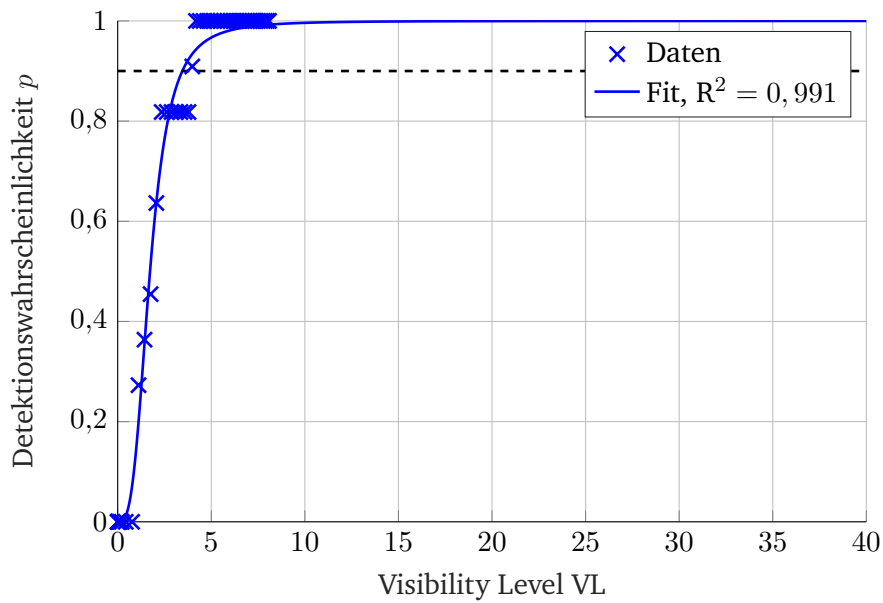


Abbildung A.53.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 16 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 3,454 benötigt.

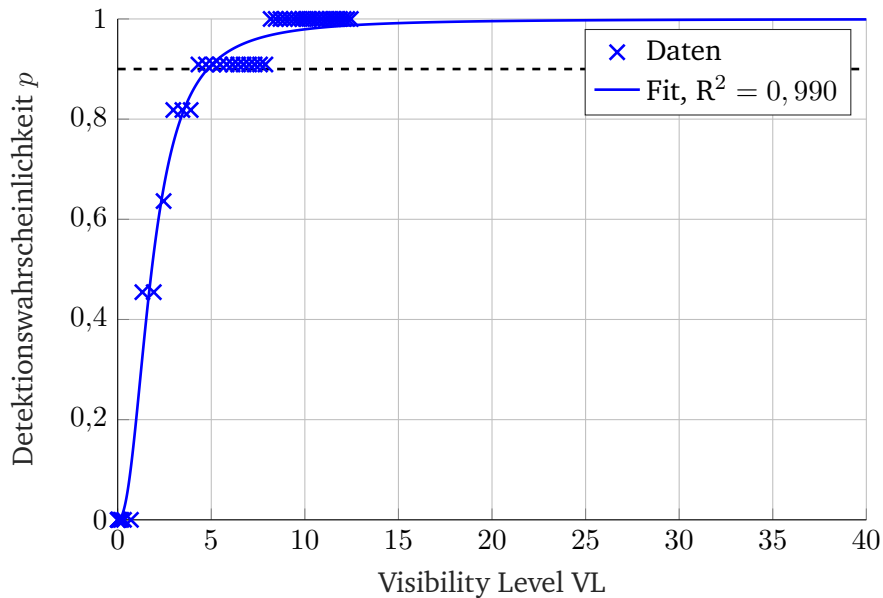


Abbildung A.54.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 17 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 4,804 benötigt.

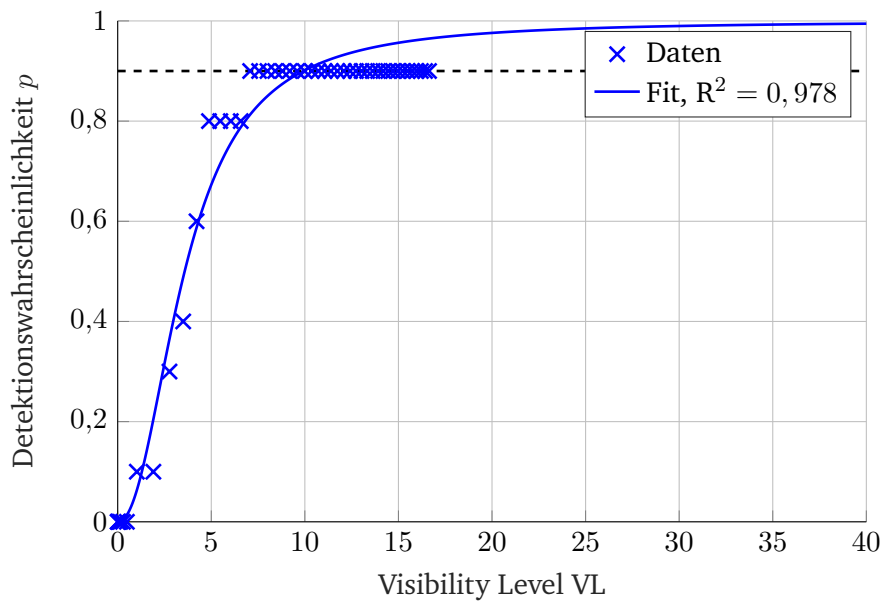


Abbildung A.55.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 18 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 9,920 benötigt.

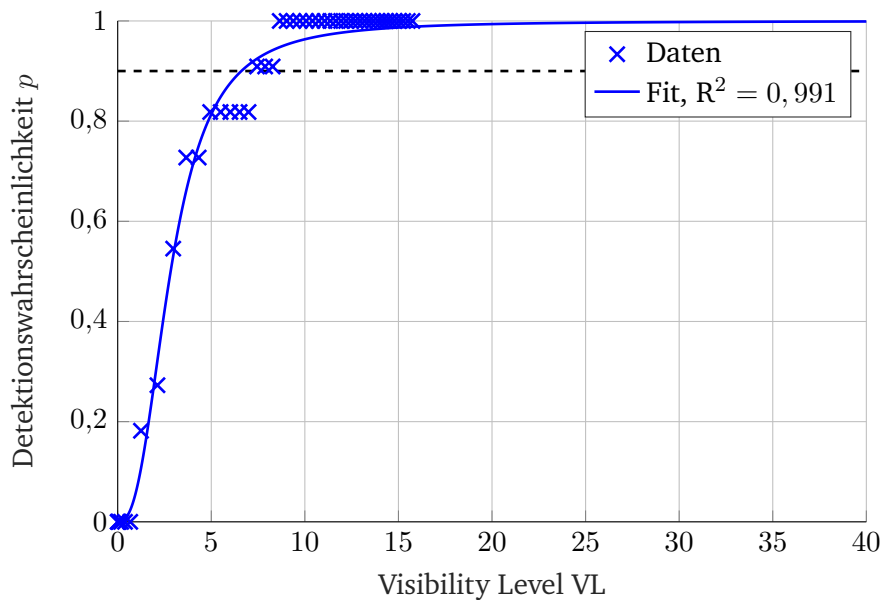


Abbildung A.56.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 19 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 6,610 benötigt.

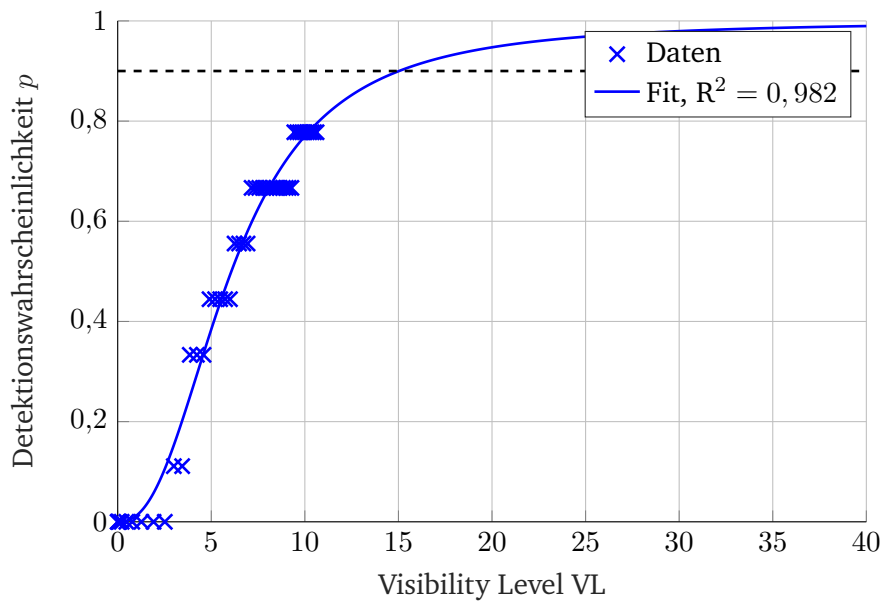


Abbildung A.57.: Zusammenhang der Detektionswahrscheinlichkeit p und des Visibility Levels VL der Graukarte auf Objektposition 20 im Lichtkanal; um eine Detektionswahrscheinlichkeit p von 90 % zu erreichen, wird ein Visibility Level von 15,030 benötigt.

A.3. Objektgröße α der Graukarte in Abhängigkeit des Abstands

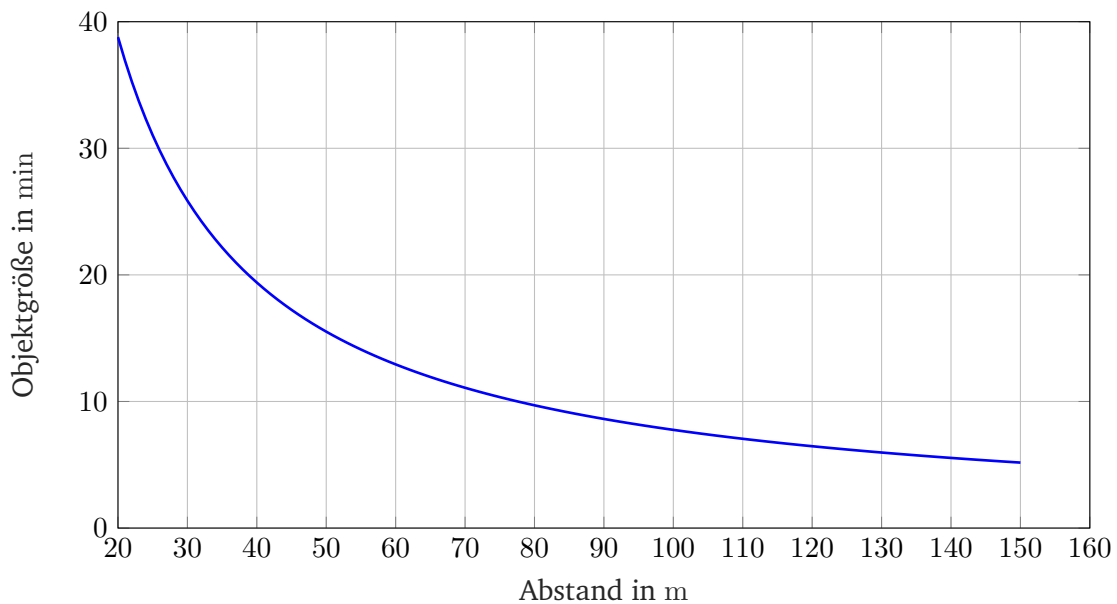


Abbildung A.58.: Objektgröße α der Graukarte in Abhängigkeit des Abstands; mit steigendem Abstand sinkt die Objektgröße α in min und befindet sich im Ricco-Bereich.

A.4. Weberkontrast K_W auf den Graukarten bei der zweiten Konstellation auf den drei Teststraßen im nächtlichen urbanen Verkehrsraum

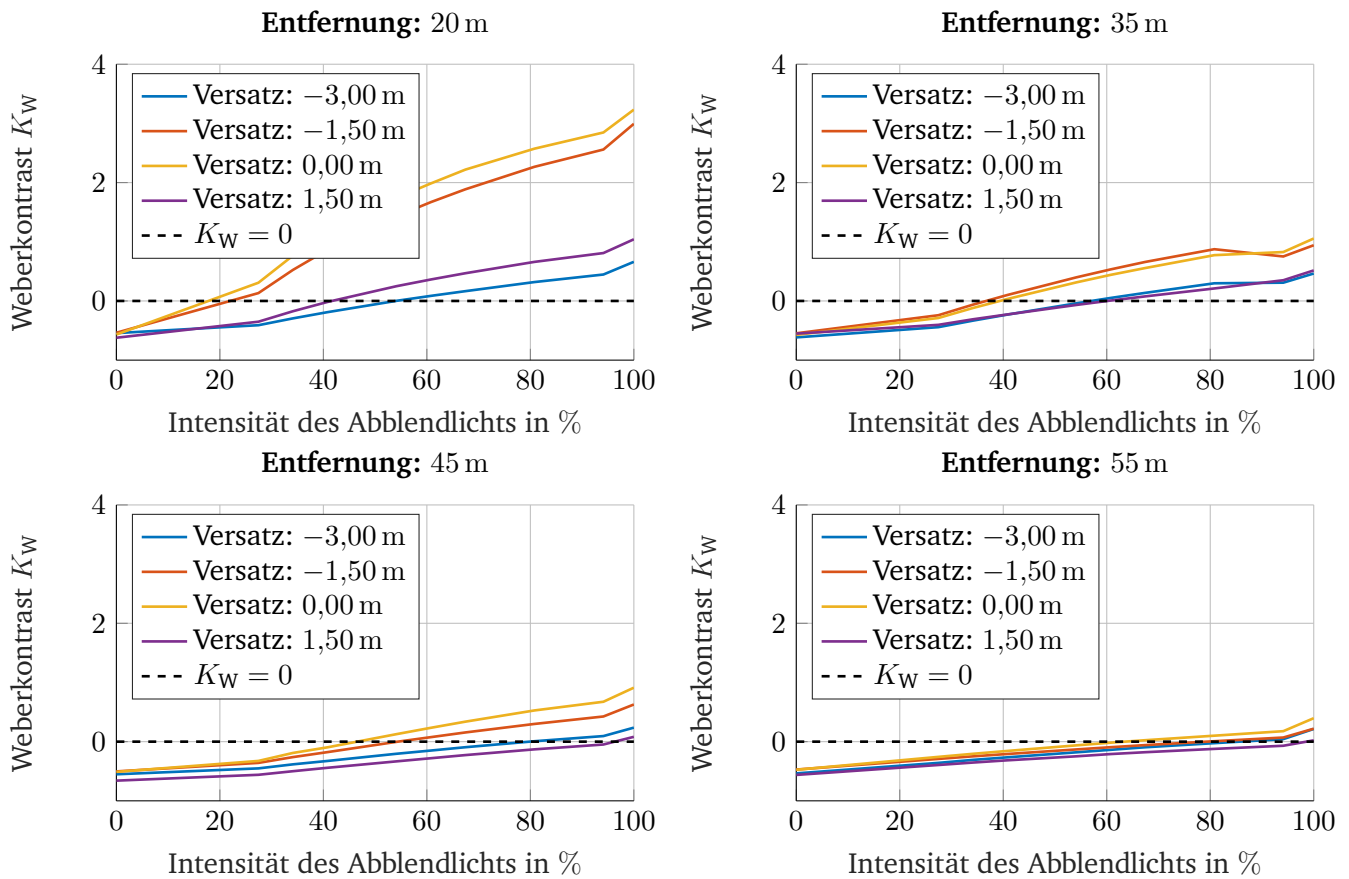


Abbildung A.59.: Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Ablendlichts auf Teststraße 1 bei Konstellation 2.

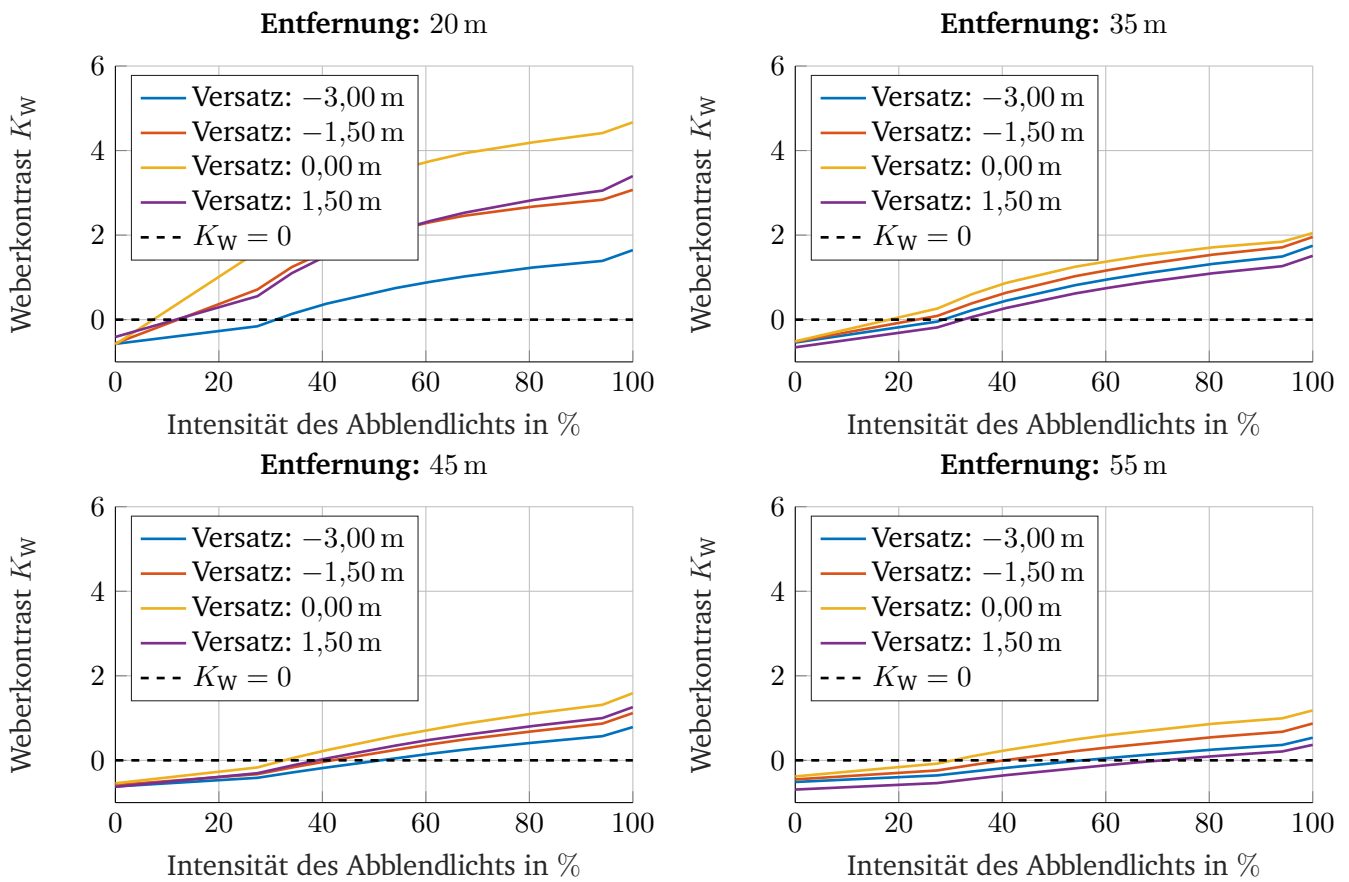


Abbildung A.60.: Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 2 bei Konstellation 2.

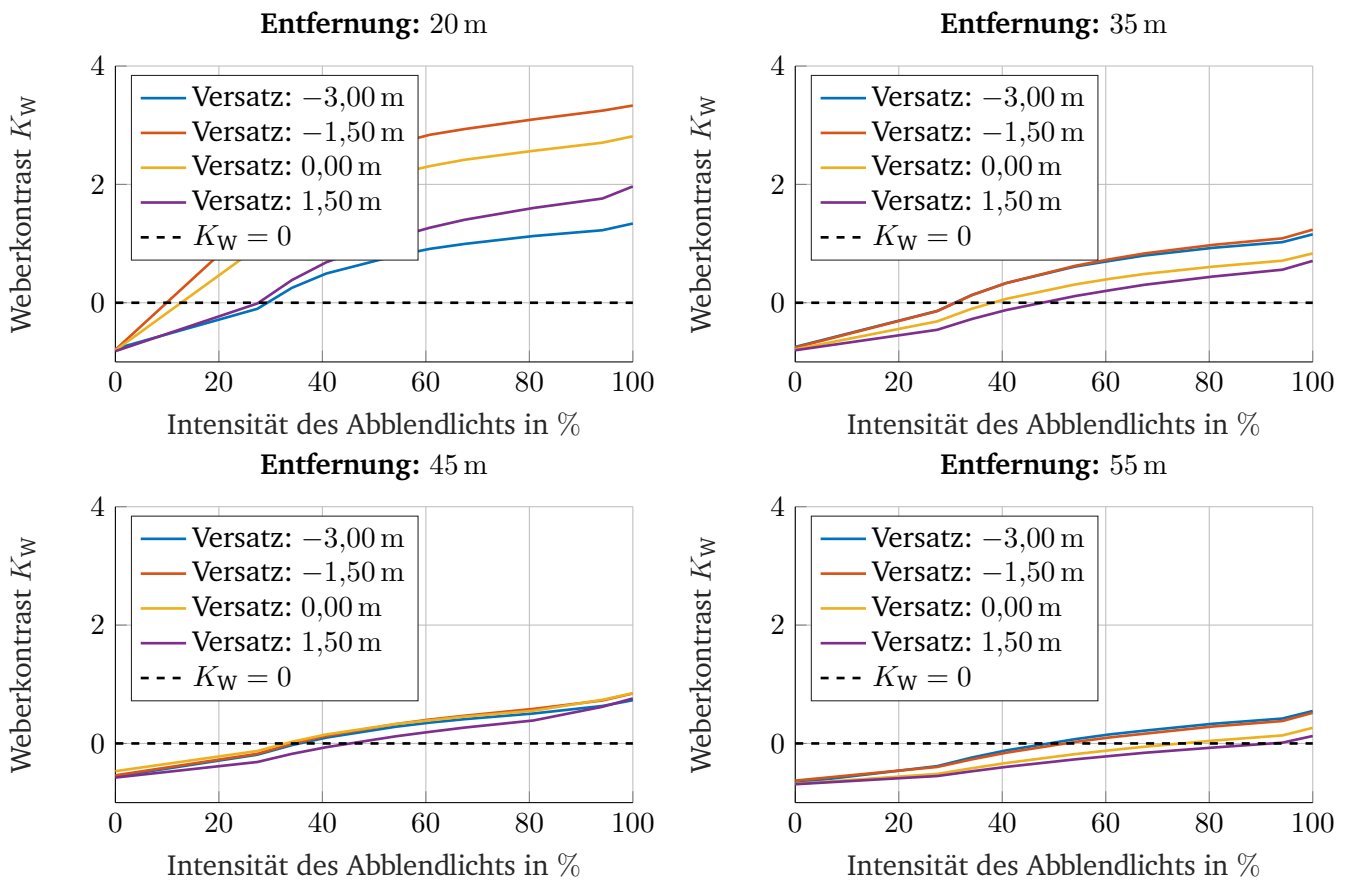


Abbildung A.61.: Weberkontrast K_W auf der Graukarte in Abhängigkeit der Entfernung, des horizontalen Versatzes der Objektposition und der prozentualen Intensität des Abblendlichts auf Teststraße 3 bei Konstellation 2.

A.5. Berechnetes Visibility Level VL auf den Graukarten bei der zweiten Konstellation auf den drei Teststraßen im nächtlichen urbanen Verkehrsraum

Tabelle A.1.: Berechnete Visibility Level VL für die zweite Konstellation auf Teststraße 1

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abblendlichtintensität 0 %				Abblendlichtintensität 100 %			
	Abstand zum Fahrzeug in m				Abstand zum Fahrzeug in m			
	30	45	55	65	30	45	55	65
-3,00	40,16	33,11	23,38	17,99	31,35	16,58	6,66	5,03
-1,50	39,45	28,68	20,92	15,63	149,04	34,15	17,31	4,95
0,00	42,21	31,14	21,17	15,88	169,81	38,78	25,40	9,17
1,50	48,19	33,76	31,38	21,35	54,34	20,08	2,54	0,57

Tabelle A.2.: Berechnete Visibility Level VL für die zweite Konstellation auf Teststraße 2

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abblendlichtintensität 0 %				Abblendlichtintensität 100 %			
	Abstand zum Fahrzeug in m				Abstand zum Fahrzeug in m			
	30	45	55	65	30	45	55	65
-3,00	32,83	22,16	21,38	13,34	70,15	52,23	18,66	9,82
-1,50	34,09	22,48	20,78	11,69	152,23	63,35	27,58	16,63
0,00	36,98	22,38	18,85	8,87	247,55	72,39	39,44	21,67
1,50	26,00	30,36	23,09	20,42	162,93	50,33	32,80	8,22

Tabelle A.3.: Berechnete Visibility Level VL für die zweite Konstellation auf Teststraße 3

Versatz zur Fahrzeuglängsachse in m	Abblendlichtintensität 0 %				Abblendlichtintensität 100 %			
	Abstand zum Fahrzeug in m				Abstand zum Fahrzeug in m			
	30	45	55	65	30	45	55	65
-3,00	35,55	25,72	14,26	13,59	56,08	33,68	15,98	8,89
-1,50	40,44	28,85	14,88	13,81	169,47	38,68	19,74	8,77
0,00	48,72	33,94	13,56	17,05	151,08	28,92	21,36	4,95
1,50	51,41	35,78	18,84	18,91	95,21	23,5	19,7	2,58

A.6. Anteil an detektierten Objektpositionen für die zweite Konstellation auf den untersuchten Teststraßen

Tabelle A.4.: Anteil an detektierten Objektpositionen für die zweite Konstellation auf den untersuchten Teststraßen

Teststraße	Abblendlichtintensität 0 %			Abblendlichtintensität 100 %		
	$p > 90\%$	$p > 70\%$	$p > 50\%$	$p > 90\%$	$p > 70\%$	$p > 50\%$
1	16/16	16/16	16/16	12/16	13/16	16/16
2	13/16	15/16	15/16	13/16	15/16	15/16
3	14/16	16/16	16/16	14/16	16/16	16/16

Veröffentlichungen und betreute Abschlussarbeiten

Im Folgenden werden eigene Veröffentlichungen und betreute Abschlussarbeiten aufgelistet, deren Ideen und Ergebnisse zum Teil in die vorliegende Arbeit eingeflossen sind. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass einige Ideen und Inhalte dieser Arbeit bereits in einer der nachfolgend gelisteten Veröffentlichungen erschienen ist.

Veröffentlichungen

- A. Erkan**, J. Kobbert, K. Kosmas, T. Q. Khanh, „Lichttechnische Eignungsprüfung von Retrofit-LEDs als Ersatz für Halogenglühlampen in Kfz-Scheinwerfern“. Lux Junior 2019 - 14. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, Ilmenau, 2021. DOI: 10.22032/DBT.39622
- A. Erkan**, K. Kosmas, J. Kobbert, T. Q. Khanh, „Energy saving potential of headlights by determining the current utilization rate of headlight functions“. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2019.
- M. Wagner, **A. Erkan**, K. Kosmas, T. Q. Khanh, „Reducing Head Lighting Level on Urban Roads for Different Street Lighting Situations“. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2019.
- A. Erkan**, K. Kosmas, J. Kobbert, T. Q. Khanh, „Analyse der CO₂-Emissionen von Lichtfunktionen“. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 122 (2), S. 28-33, 2020. DOI: 10.1007/s35148-019-0180-2
- T. Singer, A. Stuckert, **A. Erkan**, D. Hoffmann, T. Q. Khanh, „Behaviour of automated vehicles in critical situations with pedestrians - Accident prevention through additional light signals“, SIA VISION, Paris, 2020.
- A. Erkan**, T. Q. Khanh, „Vergleich von konventionellen H7-Halogenglühlampen und zugelassenen Retrofit-LEDs anhand eines Kfz-Scheinwerfers“. Lux Junior 2021 - 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, Ilmenau, 2021. DOI: 10.22032/dbt.49309
- D. Hoffmann, **A. Erkan**, T. Q. Khanh, „Lichttechnische Analyse des deutschen Verkehrsraumes zur Optimierung von Lichtverteilungskurven für Scheinwerfer im Kraftfahrzeug“. Lux junior 2021: 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, Ilmenau, 2021. DOI: 10.22032/dbt.49314
- M. Wagner, **A. Erkan**, T. Q. Khanh, „Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlichen Scheinwerfereinstellungen unter konstanter Straßenbeleuchtung“. Lux junior 2021: 15. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, Ilmenau, 2021. DOI: 10.22032/dbt.49336
- A. Erkan**, S. Babilon, D. Hoffmann, T. Singer, T. Vitkov, T. Q. Khanh, „Determination of Speed-Dependent Roadway Luminance for an Adequate Feeling of Safety at Nighttime Driving“. Vehicles 3 (4), S. 821-839, 2021. DOI: 10.3390/vehicles3040049
- A. Erkan**, D. Hoffmann, T. Singer, T. Q. Khanh, „Field Test Validation of the Headlamp Safety Performance Rating (HSPR)“, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2022.

T. Singer, **A. Erkan**, J. Willmann, D. Hoffmann, T. Q. Khanh, „Photometric Characterization and Evaluation of Head-Mounted-Displays for Virtual Night Driving“. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2022.

D. Hoffmann, **A. Erkan**, T. Singer, T. Q. Khanh, „Investigation of different influencing parameters on the quality of object detection by camera systems in highly automated vehicles“. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2022.

A. Erkan, L. A. Engelbrecht-Schnür, D. Hoffmann, M. Peier, K. Kunst, T. Singer, T. Q. Khanh, „Efficiency enhancement opportunities for automotive lighting systems by traffic situation analysis“. SIA VISION, Paris, 2022.

D. Hoffmann, **A. Erkan**, K. Kunst, M. Peier, T. Singer, T. Q. Khanh, „Investigation of the influence of camera parameters on data quality for highly automated vehicles“. SIA VISION, Paris, 2022.

Betreute Abschlussarbeiten

Neben den eigenen Forschungsaktivitäten stellt die Betreuung von studentischen Abschlussarbeiten einen wesentlichen Bestandteil der Tätigkeit eines wissenschaftlichen Mitarbeiters an der Technischen Universität Darmstadt dar. Dadurch stammen einige der in dieser Arbeit vorgestellten Ideen und Ergebnisse aus den nachfolgend gelisteten Abschlussarbeiten. Da die nachfolgend gelisteten Abschlussarbeiten das ausgewiesene Ziel hatten einen Beitrag zu der vorliegenden Arbeit zu leisten, werden entsprechende Abschnitte in der Arbeit nicht als solche zitiert.

P. Endres, „Validierung bisheriger Untersuchungen zum Thema Blendung sowie deren Übertragbarkeit auf reale Begegnungssituationen“, Studienarbeit, 2019.

C. Hinterwälder, „Analyse der Einstellgenauigkeit von Kfz-Scheinwerfern und Identifizierung von Ursachen der Verlagerungen des Scheinwerfer-Lichtbilds“, Masterarbeit, 2019.

S. Sadkowiak, „Implementierung einer Ansteuerungs- und Kalibriersoftware für ein Stereokamerasystem“, Bachelorarbeit, 2019.

J. Simon, „Auswirkungen der Pulsform von Bremslichtfunktionen auf die Reaktionszeit und das Blendempfinden“, Bachelorarbeit, 2019.

M. Zitane, „Modifikation des automatischen Fahrlichts im mesopischen Bereich“, Bachelorarbeit, 2019.

A. Hadhri, „Überprüfung der Integrierbarkeit der dritten Bremsleuchte in die Schlussleuchtenleiste“, Bachelorarbeit, 2019.

M. Riad, „Sensor-Fusion zur situationsbedingten Erfassung und Klassifizierung von Blendereignissen durch Bildverarbeitung“, Masterarbeit, 2020.

P. O’Conner, „Construction and Implementation of a Camera System for Spatially Resolved Distance Measurement Utilizing Machine Learning“, Masterarbeit, 2020.

J. Schikowski, „Ermittlung minimal notwendiger Stadtlichtverteilungen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen“, Masterarbeit, 2020.

L. Grebe, „Analyse und Implementierung von Visual Performance Modellen“, Projektseminar, 2021.

-
- A. Soylu, „Entwicklung eines Systems zur Ferninspektion und prädiktiven Instandhaltung von Prozessanalysatoren“, Masterarbeit, 2021.
- N. Kreß, „Untersuchung eines projektionsbasierten, lichttechnischen Assistenzsystems und Definition von photometrischen Randbedingungen“, Bachelorarbeit, 2021.
- T. Schlürscheid, „Identifikation und Definition von Anforderungen an Lichtinszenierungen im Nahfeld eines Kraftfahrzeugs mittels einer psychophysikalischen Studie“, Masterarbeit, 2021.
- J. Leilich, „Clustering von Fahrbahnoberflächen anhand ihrer Reflexionscharakteristik“, Bachelorarbeit, 2021.
- J. Fließbach, „Modifikation und Kalibrierung einer handelsüblichen Kamera zur Aufnahme von Leuchtdichtebildern“, Masterarbeit, 2021.
- T. Vitkov, „Entwicklung eines kompakten und modularen Sensorsystems für die Integration in Kraftfahrzeuge“, Bachelorarbeit, 2022.
- S. Wang, „Aufbau und Charakterisierung eines Systems zur Erzeugung verschiedener dynamischer Lichtverteilungen für Kraftfahrzeuge“, Masterarbeit, 2022.
- K. Kunst, „Untersuchung des Blickverhaltens von Personen beim Führen eines Kraftfahrzeuges“, Masterarbeit, 2022.
- A. Hadhri & M. Zitane, „Aufbau und Charakterisierung eines Messaufbaus für die Untersuchung von Stereokamerasystemen“, Projektseminar, 2022.
- M. Zitane, „Probandenstudie zur Validierung neuer Scheinwerferlichtverteilungen für beleuchtete Straßenszenen“, Masterarbeit, 2022.
- I. Iliev, „Aufbau, Charakterisierung und Validierung eines portablen Fahrbahnreflektometers“, Bachelorarbeit, 2022.
- N. Kreß & K. Sallehsari, „Ermittlung minimal notwendiger Frontscheinwerferlichtverteilungen im außerstädtischen Bereich“, Projektseminar, 2022.