

Lichttechnische Analyse des deutschen Verkehrsraumes zur Optimierung von Lichtverteilungskurven für Scheinwerfer im Kraftfahrzeug

David Hoffmann, M.Sc., Anil Erkan, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik, Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt

Abstract/Zusammenfassung

Seit Einführung der asymmetrischen Abblendlichtverteilung im Jahr 1957 hat sich die grundsätzliche Lichtverteilung von Kfz-Scheinwerfern kaum verändert. Da sich das Verkehrsbild und die relevanten Straßenparameter, wie die Straßengeometrie oder das Verkehrsaufkommen, seitdem stark verändert haben, eignen sich diese Lichtverteilungen nur bedingt für den Einsatz im heutigen nächtlichen Straßenverkehr. Aktuelle Zusatzfunktionen, wie Autobahn- und Stadtlicht, können bereits in unterschiedlichen Verkehrsräumen aktiviert werden, jedoch fehlen Informationen bezüglich des Verkehrsraumes, die eine vollkommen dynamische Steuerung dieser Lichtfunktionen ermöglichen könnte.

Daher besteht eine Notwendigkeit darin, Kenntnis über die lichttechnischen und geometrischen Bedingungen des Verkehrsraumes zu gewinnen. Aus vorherigen und aktuell laufenden Untersuchungen ist der Schwellenkontrast für die sichere Detektion von Objekten im nächtlichen Straßenverkehr bekannt. Um jederzeit eine optimale Ausleuchtung der Fahrbahn und relevanter Objekte zu gewährleisten, ist eine Kenntnis des aktuellen Beleuchtungsniveaus und der Straßengeometrie essenziell.

Diese Arbeit präsentiert erste Ergebnisse, benötigte Daten und Methoden zur Datenauswertung des deutschen Verkehrsraumes, um Lichtverteilungen von Kfz-Scheinwerfern zu optimieren.

Index Terms: Kfz-Lichttechnik, Verkehrsdaten, Unfalldaten, Lichtverteilung, Straßenbeleuchtung, Straßengeometrie

1 Einleitung

Kraftfahrzeug-Frontbeleuchtungssysteme dienen dazu, dem Fahrzeugführer eine sichere Teilnahme am nächtlichen Straßenverkehr zu gewährleisten. Nach der Einführung des asymmetrischen Abblendlichtes im Jahr 1957 wurden verschiedene Erweiterungen wie das Schlechtwetterlicht, Kurvenlicht oder Stadtlicht zur Verbesserung der Sichtbarkeit von Objekten in verschiedenen Szenarien angeboten.



Diese Funktionen gehen teilweise schon auf die unterschiedlichen Geometrien des Verkehrsraumes ein. Das Kurvenlicht lenkt die Lichtverteilung dabei mehr in die Innenseite der Kurve, um den Straßenrand- und die Führungsbahn besser auszuleuchten und die Stadtlichtverteilung verbreitert die Lichtverteilung, um die Detektion von schwächeren Verkehrsteilnehmern zu verbessern. Beide Funktionen zeigen, dass es sinnvoll ist, die Lichtverteilung der gegebenen Geometrie anzupassen, um die Sicherheit zu erhöhen.

Die Detektion von Objekten im nächtlichen Straßenverkehr ist abhängig von der Größe, Form, den Reflexionseigenschaften des Objektes und den daraus folgenden Kontrasten sowie die Position der Objekte in Relation zum Fahrzeug. Für die benötigten Kontraste wurden bereits Studien beispielsweise von Wagner, Schneider und Damasky durchgeführt [1 – 3]. Aus diesen Studien lassen sich die benötigten Kontraste für verschiedene Winkel und Abstände, für Straßen mit und ohne fest installierte Straßenbeleuchtung, ableiten. Um aus den benötigten Kontrasten eine Lichtverteilung zu erstellen, ist es notwendig, eine Geometrie als Grundlage zu verwenden, in deren Bereich eine sichere Detektion gewährleistet sein soll. Diese Geometrien sind jedoch je nach Umgebung unterschiedlich, da es sich um eine schlecht beleuchtete, einspurige Anliegerstraße, oder eine mehrspurige, gut beleuchtete Hauptstraße handeln kann. Für die Analyse des Verkehrsraumes wurden ebenfalls Studien beispielsweise von Kobbert und Gibbons durchgeführt [4,5].

2 Datenaufnahme

Zur lichttechnischen Analyse des Verkehrsraumes werden verschiedene Daten verwendet. Im ersten Schritt werden Orte besonderer Relevanz anhand von Unfall- und Verkehrsdaten ausgewählt. An den gewählten Orten werden Leuchtdichte- sowie Beleuchtungsstärkedaten aufgenommen und die Geometrie des Verkehrsraumes mithilfe von Satellitendaten bestimmt.

2.1 Verkehrsdaten

Die Auswahl der Orte zur Optimierung von Kfz-Lichtverteilungen findet im ersten Schritt anhand von Verkehrs- und Unfalldaten statt. Hierfür werden für erste Untersuchungen Verkehrsdaten für den Innenstadtbereich in Darmstadt, bereitgestellt von *TomTom N.V.*, verwendet. Die Daten sind im Zeitraum vom 14.01.2019 bis 20.01.2019 und vom 08.07.2019 bis 14.07.2019 erhoben. Zur besseren Einteilung sind die Daten in vier Zeitslots (0 – 6 Uhr, 6 – 12 Uhr, 12 – 18 Uhr und 18 – 24 Uhr) aufgeteilt. Die Daten für Januar sind in Abbildung 1 (links) zu sehen. Abbildung 2 zeigt den Vergleich der Daten zwischen Januar und Juli 2019. Das Verkehrsaufkommen für beide Monate ist vergleichbar, jedoch ist gut zu erkennen, dass im Juli 2019 mehr Fahrzeuge am Wochenende in den Abendstunden unterwegs sind.

Abbildung 1 (rechts) zeigt Orte in Darmstadt, in denen es in nächtlichen Lichtbedingungen zu Verkehrsunfällen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern, das

bedeutet mit Fußgängern oder Fahrradfahrern, kam. Die Daten hierfür stammen aus dem Unfallatlas der Jahre 2016 bis einschließlich 2019 [7].

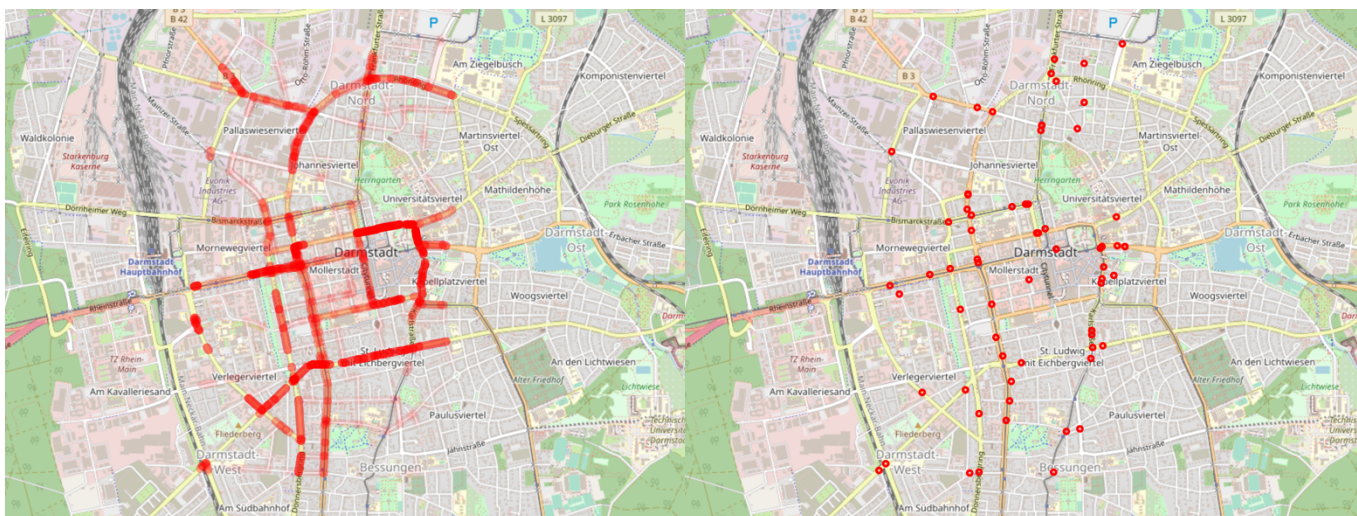


Abbildung 1 Verkehrsdaten vom 14.01.2019 bis 20.01.2019 (links) Unfallstellen zwischen Kraftfahrzeugen und schwächeren Verkehrsteilnehmern in nächtlichen Verkehrsbedingungen aus den Jahren 2016 bis 2019

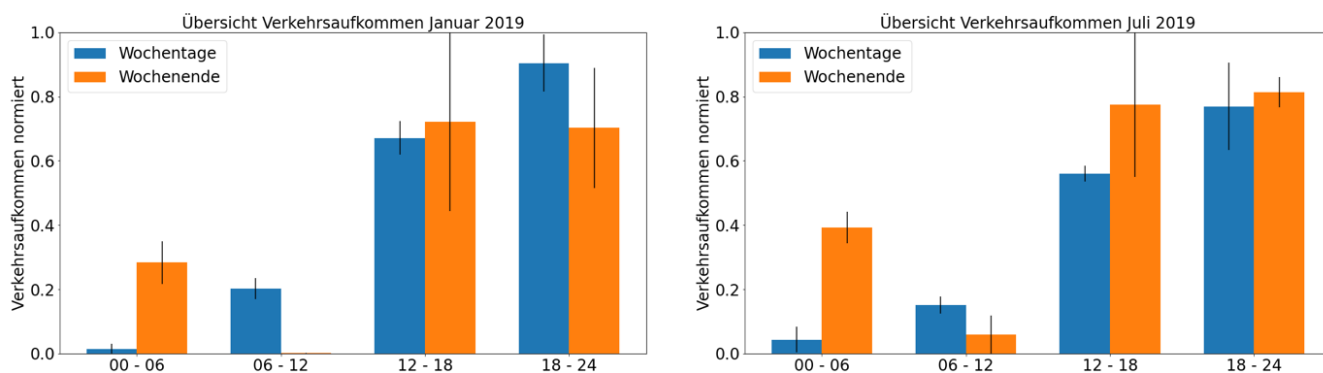


Abbildung 2 Vergleich des Verkehrsaufkommens über den Tag mit Unterscheidung für Wochentage und Wochenende für Januar 2019 (links) und Juli 2019 (rechts)

Mithilfe dieser Daten ist es möglich, Orte mit vielen Unfällen und einem hohen Verkehrsaufkommen, oder viele Verkehrsunfälle und wenig Verkehrsaufkommen zu extrahieren. Orte mit wenigen Verkehrsunfällen sind vorerst nicht berücksichtigt.

2.2 Leuchtdichte

Mithilfe dieser Daten wird für eine erste Untersuchung Leuchtdichteaufnahmen an 15 Orten angefertigt. Zur ersten Analyse werden die Daten in 6 Anliegerstraßen und 9 Hauptverkehrsstraßen aufgeteilt. Die Leuchtdichtekamera ist dabei mittig zentriert und auf Augenhöhe des Fahrers montiert. In Abbildung 3 sind beispielsweise Leuchtdichtebilder einer Hauptstraße (links zwei Bilder) und einer Anliegerstraße (rechts zwei Bilder) mit jeweils ein- und ausgeschaltetem Scheinwerfer zu sehen. Die

mittlere Leuchtdichte für die Hauptstraße beträgt $2,08 \frac{cd}{m^2}$ bei eingeschalteten Scheinwerfern und $1,27 \frac{cd}{m^2}$ bei ausgeschalteten Scheinwerfern. Für die Anliegerstraße beträgt die Leuchtdichte $1,89 \frac{cd}{m^2}$ bzw. $1,21 \frac{cd}{m^2}$. In diesem Beispiel liegt die mittlere Leuchtdichte bei ausgeschalteten Scheinwerfern in einem ähnlichen Bereich, jedoch beträgt die Standardabweichung für die Hauptstraße $9,99 \frac{cd}{m^2}$ im Vergleich zu $30,79 \frac{cd}{m^2}$ für die Anliegerstraße. Die Standardabweichung bietet dabei ein erstes Indiz für die Homogenität der Straßenbeleuchtung.

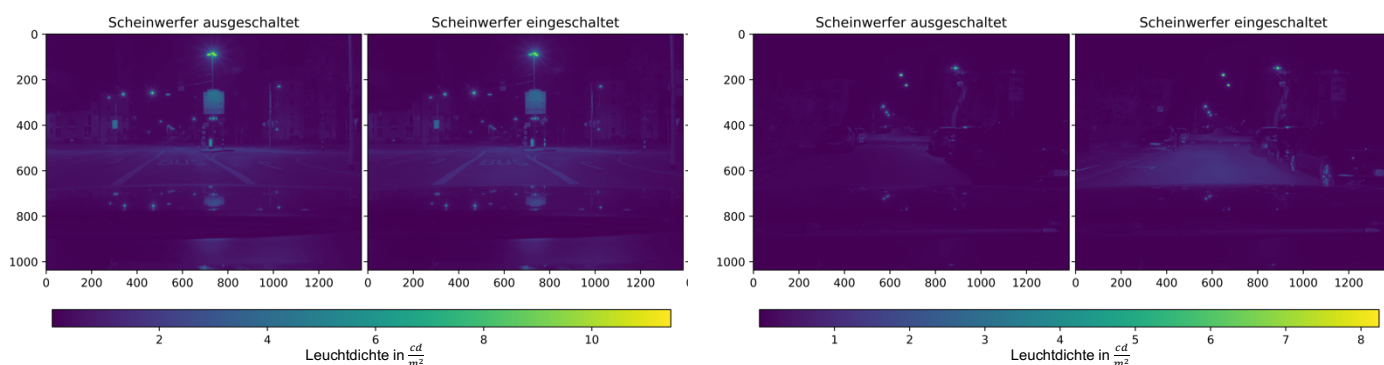


Abbildung 3 Beispiel für die Leuchtdichteaufnahmen mit ein- und ausgeschalteten Scheinwerfern für eine Hauptstraße (links) und eine Anliegerstraße (rechts)

Eine Einteilung in Haupt- und Anliegerstraßen ist bei Betrachtung von Abbildung 4 jedoch nicht ausreichend. Es ist zwar zu erkennen, dass die mittlere Leuchtdichte auf Hauptstraßen mit $0,83 \frac{cd}{m^2}$ im Vergleich zu Anliegerstraßen mit $0,56 \frac{cd}{m^2}$ bei ausgeschalteten Scheinwerfern höher ist, jedoch trifft dies nicht auf alle Straßen zu. Ein Grund hierfür ist die lange Lebenszeit von Straßenbeleuchtungen. So gibt es Hauptstraßen mit älterer Natriumdampfbeleuchtung und Anliegerstraßen mit besserer LED-Beleuchtung. Aus diesem Grund ist es schwierig, die Straßen in beispielsweise P- oder M-Klassen nach der DIN EN 13201-2 einzuteilen, da sich vor allem das Verkehrsaufkommen in den letzten Jahren deutlich erhöht hat und somit die Straßenbeleuchtung teilweise nicht mehr ausreicht. Ebenfalls gibt es keine Dokumentation der Stadt Darmstadt über die Einteilung der Beleuchtungsklassen Straßen nach DIN-EN-Norm [6].

Der Nachteil von statischen Leuchtdichteaufnahmen liegt im Zeitaufwand der Aufnahme, da das Fahrzeug hierfür mehrere Sekunden bis Minuten auf einer Stelle im öffentlichen Verkehrsraum stehen muss. Neben der Aufnahme ist es notwendig, Markierungen auf der Fahrbahn aufzustellen, um nachträglich die Leuchtdichte zusammen mit der Straßengeometrie auszuwerten. Dazu wird in der ersten

Untersuchung die Fahrbahnmarkierung und zusätzlich ein rechteckiges Brett mit bekannter Seitenlänge verwendet.

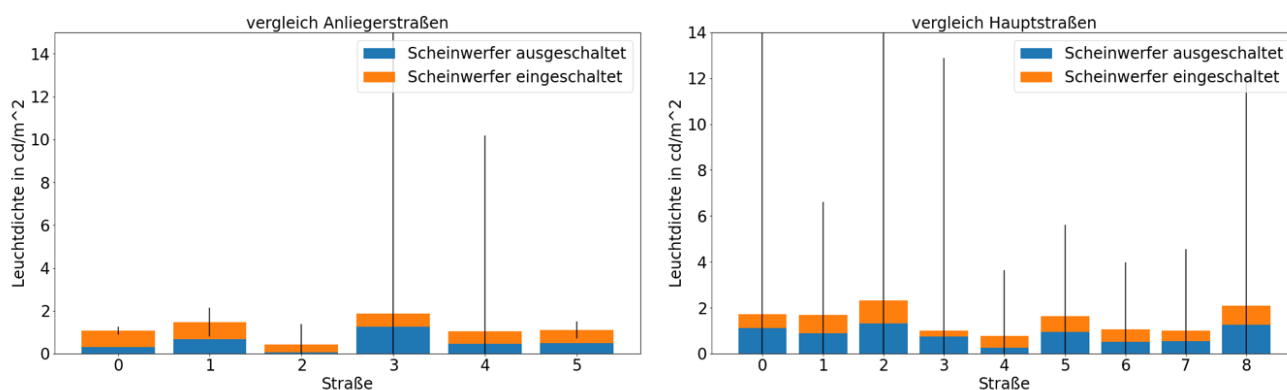


Abbildung 4 Vergleich der mittleren Leuchtdichte zwischen Anliegerstraßen (links) und Hauptstraßen (rechts)

2.2.1 Abschätzen der Leuchtdichte

Neben der Leuchtdichte wird zusätzlich die Beleuchtungsstärke dynamisch auf dem Dach des Fahrzeugs auf einer Strecke, drei Meter vor und hinter dem Fahrzeug, aufgenommen und gemittelt, um die Nachteile der statischen Leuchtdichteaufnahme zu umgehen. Abbildung 5 zeigt die 15 Messpunkte der mittleren Leuchtdichte im Vergleich zur Beleuchtungsstärke. Hierbei gibt eine lineare Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,68. Für eine aussagekräftige Statistik ist dies nicht ausreichend und weitere Daten werden benötigt, um ein besseres Modell zur Abschätzung der Leuchtdichte auf der Fahrbahn aus der Beleuchtungsstärke zu berechnen.

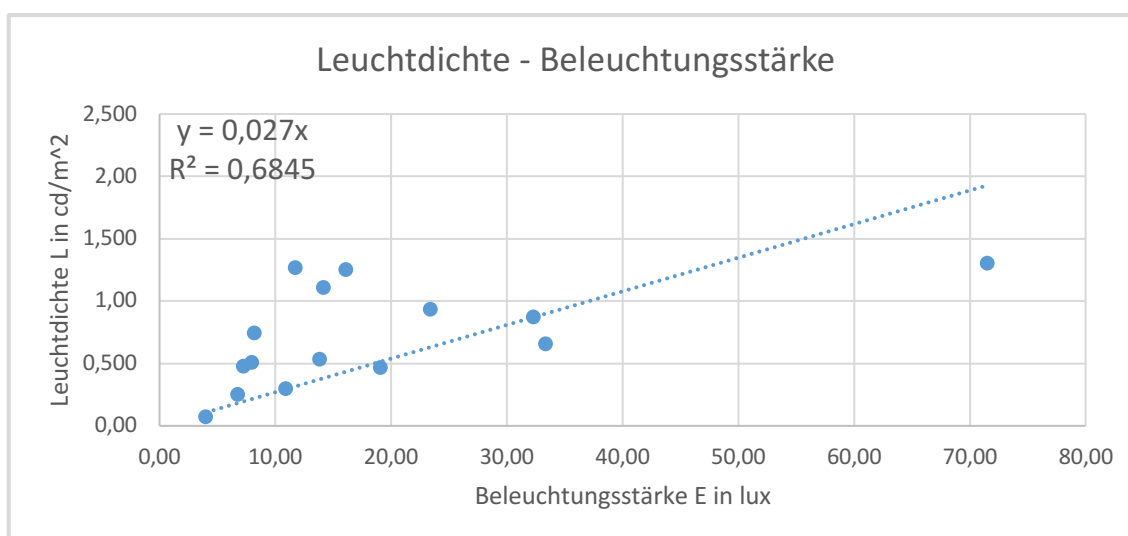


Abbildung 5 Vergleich der mittleren Leuchtdichte auf der Fahrbahn bei ausgeschalteten Scheinwerfern im Vergleich zur Beleuchtungsstärke auf dem Fahrzeugdach

Neben der Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke werden zusätzlich RGB Daten mit dem gleichen Bildausschnitt wie bei den Leuchtdichtebildern aufgenommen. Abbildung 6 zeigt dabei ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,71 bei ausgeschaltetem

Scheinwerfer zwischen der Leuchtdichte und den RGB-Mittelwerten. Bei eingeschalteten Scheinwerfern verbessert sich das Bestimmtheitsmaß R^2 auf 0,98, wie in Abbildung 7 zu sehen ist. Da bei eingeschalteten Scheinwerfern die Leuchtdichte auf der Fahrbahn höher ist, kann hier der Sensor der Kamera besser ausgeleuchtet werden und durch weniger Rauschen kann hier ein besseres Modell angenähert werden.

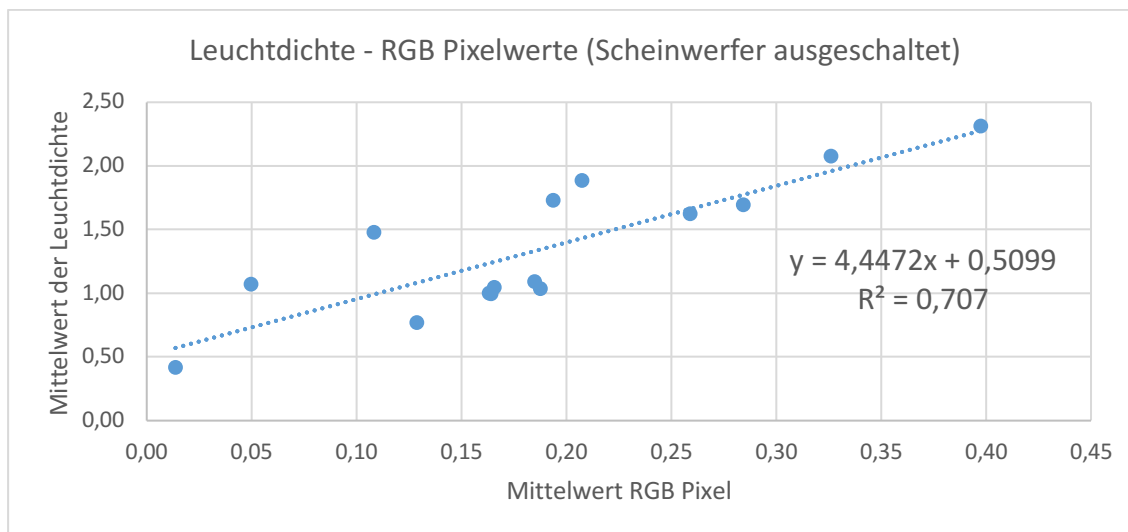


Abbildung 6 Vergleich der mittleren Leuchtdichte auf der Fahrbahn mit den mittleren RGB Werten auf der Fahrbahn bei ausgeschalteten Scheinwerfern

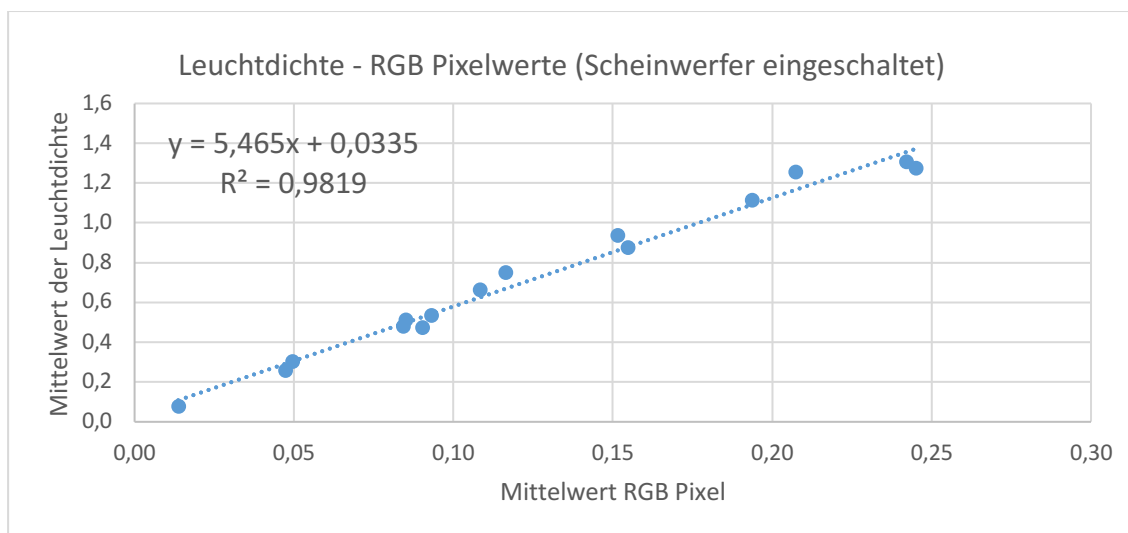


Abbildung 7 Vergleich der mittleren Leuchtdichte auf der Fahrbahn mit den mittleren RGB Werten auf der Fahrbahn bei eingeschalteten Scheinwerfern

Eine Kombination der RGB-Werte und Beleuchtungsstärke zu einem komplexeren Modell ist ebenfalls möglich. Hierfür werden jedoch mehr Daten benötigt, um eine genauere Validierung des Modells durchzuführen.

2.3 Beleuchtungsstärke

Um einen Eindruck des Beleuchtungsniveaus im Stadtbereich von Darmstadt zu bekommen, wird eine Messfahrt mit einem Beleuchtungsstärkemessgerät auf dem Fahrzeugdach und einem GPS-Empfänger zur Lokalisierung durchgeführt. Die aufgenommenen Daten sind in Abbildung 8 zu sehen. Abbildung 9 zeigt ein Histogramm über die Verteilung der Beleuchtungsstärke. Hier ist die Variation der Beleuchtungsniveaus gut zu erkennen. Eine genauere Auswertung der Daten steht jedoch noch aus.



Abbildung 8 Beleuchtungsstärke im Stadtbereich von Darmstadt mit mindestens 3 Fahrten pro Position. Die blauen Kreuze zeigen die 15 Messorte der Leuchtdichteaufnahmen an.

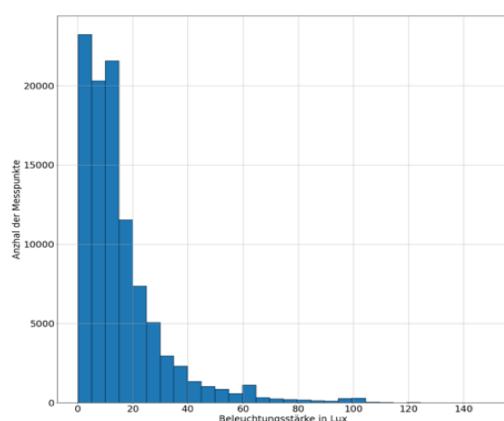


Abbildung 9 Verteilung der Beleuchtungsstärke im Stadtbereich von Darmstadt

2.4 Geometrie

Zusätzlich zu den lichttechnischen Messwerten wird die Geometrie des Verkehrsraumes betrachtet. Hierfür werden Satellitenbilder mit einer Auflösung von 20 cm der gewählten Geometrien verwendet. Die Geometrie wird mithilfe der Software RoadRunner erstellt. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel der Satellitenbilder und der zugehörigen Geometrie.

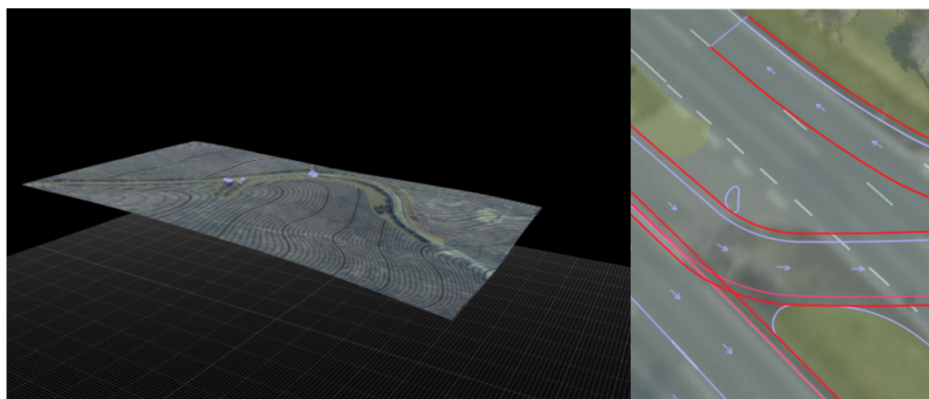


Abbildung 10 Beispiel der verwendeten Satellitenbilder und der Anwendung RoadRunner zur Erstellung von Geometrien.

Die 15 Straßen unterscheiden sich dabei hauptsächlich in ihrer Straßenbreite, Anzahl der Spuren, Parkmöglichkeiten sowie der Geometrie der Fußgängerbereiche. Die Anliegerstraßen haben eine Breite von 2,8 m bis 4 m mit zwei Spuren, Hauptstraßen hingegen besitzen eine Breite zwischen 3,1 m und 22,1m mit einer, bis sechs Spuren. Eine Unterscheidung in Einbahn- und Gegenverkehr Straßen ist ebenfalls sinnvoll, da hier auf eine asymmetrische Lichtverteilung verzichtet werden kann.

3 Erweiterung der Daten und Methodik

Für die Erstellung neuer Lichtverteilungen ist es notwendig, die Datenbasis zu erweitern und weitere Verfahren zur Auswertung anzuwenden. Hierfür ist eine Datenaufnahme mithilfe von Kameras, Beleuchtungsstärkemessgeräten und GPS-Empfängern in verschiedenen Groß- und Kleinstädten sowie außerorts geplant.

Die RGB-Kameradaten werden dabei automatisiert mithilfe neuronaler Netze in einzelne Fahrspuren sowie Aufenthaltsorte von Fußgängern segmentiert. Die Leuchtdichte auf der Fahrbahn wird dabei mithilfe eines Modells aus der Kombination von Beleuchtungsstärke und RGB-Daten berechnet. Für die weiterführende Analyse wird ein Algorithmus zum Clustern von Daten verwendet, um aussagekräftige Orte zu extrahieren. Hierfür werden aus den RGB-Daten weitere Informationen, wie die Position und Art der Straßenbeleuchtung mithilfe von automatisierter Bildverarbeitung berechnet.

Mit einer Leuchtdichtekamera wird an den ausgewählten Orten die Leuchtdichte zur Validierung der Daten aufgenommen. Diese Daten verbessern zusätzlich das Modell, die für die Abschätzung der Leuchtdichte notwendig ist.

Für die aufgenommenen Daten und mithilfe der Ergebnisse von vorherigen Untersuchungen für die benötigten Detektionskontraste wird das Visibility Level [8] für verschiedene Objekte mit unterschiedlichen Größen, Formen und Reflexionsgraden berechnet. Aus dem Visibility Level und den extrahierten Geometrien lassen sich im Anschluss Lichtverteilungen generieren. Dies wird mithilfe von mathematischen Optimierungsverfahren erreicht.

4 Diskussion

Die Messwerte der ersten Testfahrt zeigen bereits die unterschiedlichen Lichtbedingungen und Geometrien des Verkehrsraumes in Darmstadt. Um eine Aussage für Deutschland treffen zu können, ist es notwendig, weitere Daten zu erfassen und auszuwerten, jedoch ist bereits erkennbar, dass für eine Optimierung von Lichtverteilungen eine Kenntnis der Beleuchtungsverhältnisse sowie der Geometrien notwendig ist.

5 References

- [1] M. Wagner, A. Erkan, K. Kosmas and T.Q. Khanh, Reducing Head Lighting Level on Urban Roads for Different Street Lighting Situations, 13th International Symposium on Automotive Lighting, Darmstadt, 2019.
- [2] K. Schneider, Object contrast determination based on peripheral Vision under nighttime driving conditions, Ph.D. Thesis, Darmstadt, 2018.
- [3] J. Damasky, Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeug – Scheinwerfer, Ph.D. Thesis, Darmstadt, 1995.
- [4] J. Kobbert, Optimization of Automotive Light Distributions for Different Real Life Traffic Situations, Ph.D. Thesis, Darmstadt, 2019.
- [5] R. Gibbons, F. Guo, J. Du, A. Medina, T. Terry, P. Lutkevich, Q. Li, Linking Roadway Lighting and Crash Safety, Transportation Research Board Annual Meeting, January, 2015.
- [6] Deutsches Institut für Normung, DIN 13201-1:2020-01 Straßenbeleuchtung – Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [7] Unfallatlas, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2021.
- [8] W. Adrian, Visibility Levels in Street Lighting: An Analysis of Different Experiments, Journal of the Illuminating Engineering Society, 22:2, 49-52, DOI: 10.1080/00994480.1993.10748039