

Scheinwerfer und Kamera als Sichtweitensensor basierend auf der spektralen Analyse der Rückstreuung

Florian Krieff¹, Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann², Dr. Mathias Niedling¹

¹Forschungsinstitut für automobiler Lichttechnik und Mechatronik (L-LAB)

²Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Lichttechnisches Institut (LTI)

Abstract

Bei der Realisierung von automatisierten Fahrsystemen setzen die Automobil- und Sensorhersteller auf unterschiedliche Sensorkonzepte hinsichtlich Typen und Anzahl der eingesetzten Technologien [1] [3] [4] [2]. Wodrin sich jedoch in aller Regel alle Systeme gleichen ist der Einsatz von Kamerasensoren als Kernbestandteil der Umgebungswahrnehmung [5] [1] [2].

Bei möglichen Störgrößen der Wahrnehmungssysteme ist Nebel eine relevante Komponente. Um die Sicherheit der Fahrfunktionen auch bei Nebel zu gewährleisten, muss deren Vorhandensein zuverlässig erfasst und klassifiziert werden.

Nebel wird als Wasserpartikel mit einer Größe von 1 bis 70 μm klassifiziert. In diesem Bereich lässt sich die Mie-Theorie anwenden [6] [7]. Aus diesem Grund wird im Folgenden die durch eine Kamera aufgezeichnete Streuung des Scheinwerferlichtes unter Berücksichtigung der Mie-Theorie bezüglich der spektralen Bestandteile analysiert und als Informationsquelle für die Umsetzung als Sichtweitensensor untersucht. Daher wird zu Beginn eine theoretische Betrachtung des erwartbaren Verhaltens mit anschließender experimenteller Untersuchung zur Validierung des Systems in einer Nebelkammer vorgenommen.

Die aufgenommenen Bilddaten der Streuung zeigen, dass das spektrale Auflösungsvermögen der Kamerasensoren ausreicht, um Veränderungen im Lichtspektrum zu erfassen. Die Unterschiede zwischen den Farbkanälen betragen jedoch nur wenige Prozent, was eine robuste Sichtweitenbestimmung erschwert. Die Intensitätsverläufe der Streuung vom Scheinwerferlicht eignen sich hingegen, um Sichtweiten zu erfassen. Die Implementierung der Nebeldetektion durch die Streulichtmessung kann durch eine Anpassung der Bildverarbeitungsalgorithmik in bereits im Fahrzeug vorhandenen Kamerasystemen umgesetzt werden.

Index Terms: automatisiertes Fahren, Nebelerkennung, hochauflösende Scheinwerfer



1 Einleitung

Im Rahmen der Entwicklung des automatisierten Fahrens wird diskutiert, wie ein Fahrzeug die Umgebung wahrnehmen kann und welche Informationen dafür relevant sind. Schaut man sich die verschiedenen Automobil- und Sensorhersteller an, so stellt man schnell fest, dass es nicht die eine Formel zu geben scheint, nach der entschieden wird, welche Sensortechnologie ausschlaggebend für die Realisierung des automatisierten Fahrens ist. Vielmehr scheint es zum aktuellen Zeitpunkt unterschiedliche Herangehensweisen an das Thema zu geben [1] [3] [4] [2]. In aller Regel kommt in den Systemen ein Kamerasensor als Kernbestandteil der Umgebungswahrnehmung zum Einsatz [5] [1] [2].

Was ebenso ersichtlich wird, ist der Bedarf an Informationen über die vorherrschenden Umweltbedingungen. Diese werden für die Anpassung der Fahraufgabe oder einer Änderung der Datenverarbeitung im Sensorverbund benötigt. Auch die automatisierten Fahrsysteme benötigen Umweltinformationen, um auch bei Störbedingungen wie Regen, Nebel oder Schnee die Fahraufgabe zu übernehmen und die Sensorverarbeitung gezielter anzupassen. Das generelle Auftreten von Nebel wird aktuell teilweise über Kamerasensoren ohne die Kopplung mit einer Strahlungsquelle realisiert. Eine feine Unterteilung in unterschiedliche Sichtweitenwerte findet dabei nicht statt. Ebenso wenig werden bestimmten Bereichen vor dem Fahrzeug unterschiedliche Sichtweitenwerte zugeordnet.

Scheinwerfersysteme werden hingegen für menschliche Fahrer entwickelt, damit diese ihre Sehaufgabe beim Führen eines Fahrzeuges bestmöglich erfüllen können. [8] [9]. Eine Koppelung mit einer Kamera, die für die automatisierten Fahrfunktionen zuständig ist, indem das Scheinwerferlicht nach bestimmten Merkmalen untersucht wird, findet nicht statt.

Das Thema dieser Arbeit ist es, eine Verbindung zwischen den in den Fahrzeugen verbauten Kameras und Scheinwerfersystemen herzustellen. Mit Hilfe der Kamera wird bei Nebel die Intensität der Streuung wie auch die spektralen Bestandteile untersucht. Es wird die in aller Regel als störend empfundene Streuung im Nebel analysiert, um darüber Informationen in Form eines Sichtweitenwertes generieren zu können. Die Scheinwerferbeleuchtung wird hierbei als Unterstützung für die Kamera und nicht den menschlichen Fahrer genutzt. Beide Systeme, Kamera und Scheinwerfer, sind bereits ohnehin in den Fahrzeugen verbaut. Bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz ergeben sich für das Scheinwerfersystem keine besonderen Anforderungen, wie eine hohe Winkelauflösung.

Nebel wird in der Literatur als Wasserpartikel mit einer Größe von 1 bis 70 μm klassifiziert, was dem Bereich entspricht, in dem sich die Mie-Theorie anwenden lässt [6] [7]. Die Auswertung der Sichtweite erfolgt daher unter Berücksichtigung der Mie-Theorie und der Definition der meteorologischen Sichtweite nach der MOR (engl.

meteorological optical range), die der in Messgeräten genutzten Sichtweitendefinition der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) entspricht [10].

Aus diesem Grund wird im Folgenden die durch eine Kamera aufgezeichnete Streuung des Scheinwerferlichtes unter Berücksichtigung der Mie-Theorie bezüglich der spektralen Bestandteile analysiert und als Informationsquelle für die Umsetzung als Sichtweitensensor untersucht. Daher wird zu Beginn eine theoretische Betrachtung des erwartbaren Verhaltens mit anschließender experimenteller Untersuchung zur Validierung des Systems in einer Nebelkammer vorgenommen.

Drei Themenfelder werden in dieser Arbeit untersucht:

1. Lassen sich die spektralen Unterschiede aus der Mie-Theorie durch Messungen nachweisen?
2. Findet man den Intensitätsverlauf, den das Bouguer-Lambert-Gesetz beschreibt?
3. Lassen sich die Hardwarekomponenten nutzen, die aktuell in den Fahrzeugen verbaut werden beziehungsweise es bereits sind?

Für die Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext ist beispielhaft die Arbeit von Gallen et al. [29] zu nennen, die sich ebenfalls mit der Kombination einer Kamera mit dem Scheinwerfersystem bei Nebel beschäftigt. Dabei liegt der Fokus der Arbeit allerdings auf der Analyse von Halos um Beleuchtungsquellen und den Abgleich von vorgerenderten Bildern einer gestreuten Scheinwerferbeleuchtung mit den von einer Kamera aufgezeichneten realen Bildern. Desto größer die Korrelation der vorgerenderten Bilder mit den real aufgezeichneten, umso höher die Wahrscheinlichkeit, dass die Sichtweite aus der Computersimulation vorherrscht.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wird abweichend davon das Streuverhalten des Scheinwerferlichtes auf die Intensität der Streuung sowie des spektralen Einflusses des Nebels untersucht.

2 Theorien zum Streuverhalten und der messtechnischen Bestimmung

Nach der Motivation und der Einordnung der Thematik dieser Arbeit, werden die Theorien erläutert, die für die Bearbeitung von Bedeutung sind. Es existieren dabei mehrere Gesetzmäßigkeiten die einen Zusammenhang zwischen der Wellenlänge der gestreuten Strahlung und der Partikeldurchmesser abbilden. Daher werden im Folgenden die beiden Gesetzmäßigkeiten der Mie- und Rayleigh-Streuung, die bei Nebel zum Tragen kommen, sowie die Gesetzmäßigkeit des Bouguer-Lambert-Gesetzes, das sich generell mit der Intensität der Streuung bei unterschiedlichen Sichtweiten beschäftigt, vorgestellt.

Mit dem Begriff Streuung ist in der Physik im Allgemeinen die Ablenkung eines Teiles der in einem Medium eingebrachten Strahlung beim Durchgang durch selbiges

gemeint [12] [13]. Die Strahlung wie zum Beispiel Licht kann sowohl an freien Atomen oder Molekülen als auch an festen Körpern wie kleinen Mikropartikeln (Rauch, Staub) oder Flüssigkeitströpfchen (Nebel, Regen) gestreut werden [14]. Die elektromagnetische Strahlung unterliegt bei der Durchdringung von Aerosolen der Absorption und Streuung, die in ihrer Gesamtheit als Extinktion bezeichnet werden [15]. Die Absorption ist im Vergleich zur Streuung bei Nebel jedoch vernachlässigbar klein, weshalb hier die Streuung mit der Extinktion als Annäherung gleichgesetzt werden kann [15] [10].

2.1 Rayleigh-Streuung

Als Rayleigh-Streuung wird die Streuung bezeichnet, die auftritt, wenn der Teilchendurchmesser, an dem Licht gestreut wird, sehr klein gegenüber der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung ist, also die Bedingung $d \ll \lambda$ erfüllt ist. Sie setzt den Fall der Einfachstreuung voraus, bei dem ein Strahlenbündel an einem einzelnen Teilchen gestreut wird [40]. Sie wird in den meisten Fällen nicht mit Nebel in Verbindung gebracht, gilt jedoch bei Partikeldurchmessern wie $0,1 \mu\text{m}$, die ebenso bei Nebel vorherrschen [16]. Für die Wellenlänge von Licht werden in der Literatur leicht unterschiedliche Wellenlängenbereiche genannt, die sich zwischen 380 und 780 nm bewegen [17] [18] [19] [20]. Bei den Teilchen im Nebel handelt es sich vor allem um Moleküle der Luft, wie kleine Aerosolteilchen mit Lineardimensionen unter $0,1 \mu\text{m}$ [15]. Aufgrund der Größe der Teilchen sind die gestreuten Lichtstrahlen zueinander kohärent [13].

Allgemein wird kurzwelliges Licht stärker gestreut als langwelliges. Die Intensität I des gestreuten Lichtes unterliegt dabei der Abhängigkeit zur Wellenlänge λ [15] [21] [6] [22]:

$$I \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Insbesondere sichtbar wird die Wellenlängenabhängigkeit des Effekts an der blauen Erscheinung des Himmels. Die stärkere Streuung des kurzwelligen blauen Anteils führt zu einer stärkeren Extinktion dieses Wellenlängenbereichs und somit zum blauen Erscheinungsbild des Himmels [15]. Je nach Partikelkonzentration in der Atmosphäre kann dieser Effekt verstärkt oder abgeschwächt werden [15]. Größere Partikel wiederum können mit der Theorie der Mie-Streuung beschrieben werden.

2.2 Mie-Streuung

Die Theorie der Mie-Streuung befasst sich mit dem speziellen Fall, dass die Durchmesser der Teilchen, an denen die Strahlung streut, in der Größenordnung der Wellenlänge liegen [6] [7]. Auch sie setzt den Fall der Einfachstreuung voraus [41] [7] [40]. Als Partikel, an denen im Falle von Licht die Mie-Streuung auftritt, sind beispielhaft kleine Aerosolpartikel, Dunstteilchen sowie Wolken- und Nebeltröpfchen zu nennen [15]. Die Durchmesser der Wasserpartikel im Nebel variieren sehr stark.

Laut Literatur betragen die Durchmesser zwischen 1 und 70 μm , wobei die größte Anzahl der Partikel einen Durchmesser zwischen 1 und 10 μm besitzt [23] [15] [24] [25]. Die Werte können jedoch je nach Region und sogar je nach Tageszeit stark voneinander abweichen [24] [25].

Aufgrund des größeren Teilchendurchmessers bei der Mie-Streuung nimmt die Wellenlängenabhängigkeit im Vergleich zur Rayleigh-Streuung ab [15] [26]. In der Literatur lässt sich folgender Zusammenhang bezogen auf den Extinktionskoeffizienten σ_e zur Wellenlänge λ finden [15] [22]:

$$\sigma_e \sim \frac{1}{\lambda^{1,0}} \text{ bis } \frac{1}{\lambda^{1,5}}$$

Der Extinktionskoeffizient ist dabei ein Maß, um die Extinktion zu beschreiben. Die Proportionalität des Extinktionskoeffizienten kann mit der zuvor genannten Intensität der Rayleigh-Streuung verglichen werden, weil er, wie zuvor erwähnt, zum großen Teil den Streuanteil enthält und somit nahezu der Proportionalität der Intensität der Streuung entspricht. Der große Bereich der Proportionalität macht deutlich, dass es sich dabei um eine starke Vereinfachung eines komplexen Zusammenhangs handelt.

2.3 Gesetzmäßigkeit messtechnische Sichtweitenbestimmung

Die messtechnische Bestimmung der Sichtweite basiert, wie von der WMO im *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* beschrieben, auf dem Bouguer-Lambert-Gesetz [10]. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen dem ausgesandten Lichtstrom F_0 , der bei Durchgang durch ein Aerosol über die Entfernung x durch den Extinktionskoeffizienten des Mediums σ_e (in der Literatur teilweise mit σ abgekürzt) abgeschwächt wird [10]. Der Lichtstrom, der nach der Entfernung x den Betrachter beziehungsweise ein Messgerät erreicht, ist F . Das Bouguer-Lambert-Gesetz [10] lautet wie folgt:

$$F = F_0 \cdot e^{-\sigma_e \cdot x}$$

Es wird nachfolgend für die Erläuterung der Intensitätsveränderung über die Sichtweite genutzt.

3 Experimentelle Untersuchung

Die zuvor erläuterten Theorien und Gesetzmäßigkeiten zeigen auf, dass die Intensität der Streuung nach dem Bouguer-Lambert-Gesetz einem festen Verlauf folgen. Ebenso unterliegen sie einem spektralen Einfluss, den die Theorien der Mie- und Rayleigh-Streuung zeigen. Kurzwellige Strahlung wird hiernach stärker gestreut als langwellige. Umso kleiner die Partikel, desto größer ist demzufolge der spektrale Unterschied in der Streuung. Zwar wird die Mie-Streuung als die bei Nebel dominierende Streuung genannte, jedoch befinden sich in der Realität im Nebel ebenso kleine Wasserpartikel, die dem entsprechen, was durch die Rayleigh-Streuung beschrieben wird.

Daher werden im Rahmen der Untersuchungen die bereits in der Einleitung genannten drei Punkte bearbeitet:

1. Lassen sich die spektralen Unterschiede aus der Mie-Theorie durch Messungen nachweisen?
2. Findet man den Intensitätsverlauf, den das Bouguer-Lambert-Gesetz beschreibt?
3. Lassen sich die Hardwarekomponenten nutzen, die aktuell in den Fahrzeugen verbaut werden beziehungsweise es bereits sind?

Im Folgenden werden daher im ersten Teil der genutzte Sensorprototyp, seine Eigenschaften, der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung erläutert. Basierend darauf werden die Gesetzmäßigkeiten aus der Theorie angewendet und vor der Untersuchung betrachtet, wie das Verhalten demnach aussehen müsste. Im Anschluss findet die Untersuchung in der Nebelkammer statt, um die Theorie in der Praxis zu überprüfen.

3.1 Sensorprototyp

Das Scheinwerfersystem basiert auf einem DLP-Developer Kit von Texas Instruments (DLP 9000) das mit einem Array aus sechs LEDs der Firma Osram kombiniert ist. Die hochauflösenden Pixelierung ist für diese Arbeit nicht von Bedeutung. Da das System in seinen Eigenschaften bereits im Rahmen andere Untersuchungen aufgebaut wurde und bekannt ist, bot es sich für eben diese Untersuchungen ebenfalls an. Solange das Spektrum der Strahlungsquelle bekannt ist, ist in der Theorie ebenso wenig zwingend ein LED-Leuchtmittel notwendig. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich damit auf handelsüblichen Scheinwerfer übertragen.

Für die Bildaufnahmen wird eine 7 Megapixel RGB-Kamera (Baumer VLXT 71C.I [27]) genutzt, die ebenfalls im Rahmen andere Untersuchungen mit dem Scheinwerfer synchronisiert wurde und sich daher für die Untersuchung eignet. Die Auflösung ist für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit nicht entscheidend. Es würde ebenso ein Kameramodul mit einer Auflösung von 2 Megapixel ausreichen. Abbildung 1 zeigt den skizzierten Aufbau des Systems.

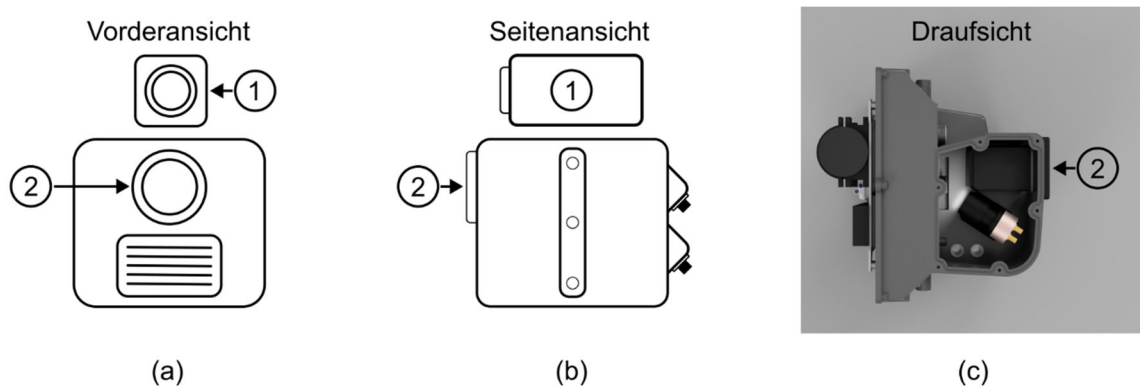


Abbildung 1 Der für die Untersuchung eingesetzte Kamera-Scheinwerfer-Sensor.

Die Kombination wird im Folgenden als Kamera-Scheinwerfer-Sensor bezeichnet. Die für die Untersuchung entscheidenden Elemente sind die Kamera auf der Oberseite (1)

und der Lichtaustritt des Scheinwerfermoduls (2). In der Draufsicht (c) ist der geöffnete Scheinwerferprototyp zu sehen.

Da spektrale Einflüsse untersucht werden, wurde das in der Abbildung 2 dargestellte LED-Spektrum des Scheinwerfermoduls vermessen.

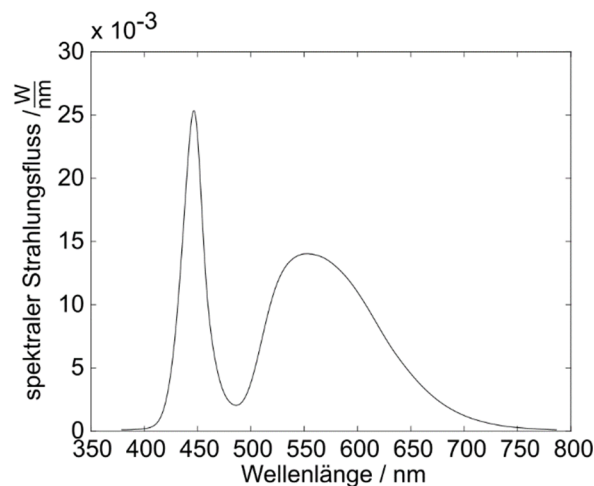


Abbildung 2 Spektrale Verteilung des in der Arbeit genutzten Scheinwerfersystems

Ebenso wurden die Farbkanäle des Kameramoduls in den Objektivkonfigurationen, wie es für die Untersuchungen genutzt wurde, vermessen (vgl. Abbildung 3).

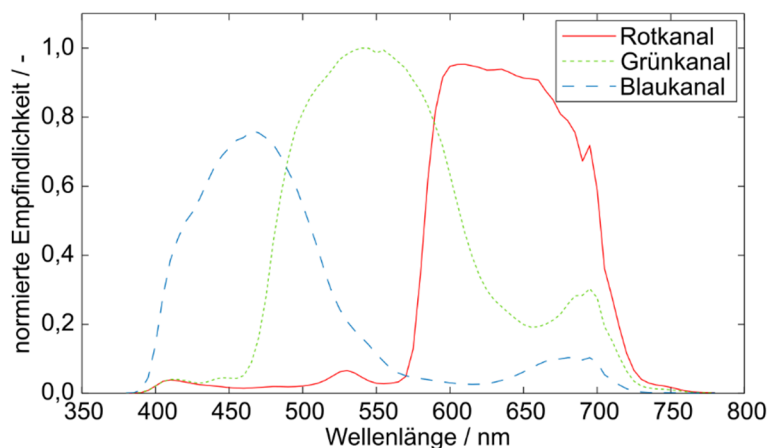


Abbildung 3 Spektrale Empfindlichkeit des hier genutzten Kameramoduls

Damit die Empfindlichkeiten der Farbkanäle der Kamera auf die Intensitäten des Scheinwerfermoduls eingestellt werden können, um direkt spektrale Veränderungen des gestreuten Lichtes nachzuvollziehen, wurde ein Weißabgleich der Kamera auf das Spektrum der LED-Strahlung durchgeführt. Die aus dem Weißabgleich errechneten Verstärkungsfaktoren zeigt Tabelle 1, mit denen jeder Farbkanal multipliziert wird, sodass die Pixelwerte jedes Kanals nahezu identisch sind.

Tabelle 1 Die über den Weißabgleich ermittelt Verstärkungsfaktoren der Farbkanäle der Kamera.

Farbkanal	Weißabgleich Kamera
Rotkanal	1,8591
Grünkanal	1,0000
Blaukanal	2,0392

3.2 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in der Nebelkammer in Abbildung 4 durchgeführt, in der die Position des Prototypens während der Messungen eingezeichnet ist. Durch die technischen Gegebenheiten der Kammer und die Möglichkeit, Messungen mit einer hohen Wiederholgenauigkeit durchführen zu können, wurde diese als Ort der Untersuchungen ausgewählt. Die Qualität der Nachbildung des dort erzeugten Nebels [28] sorgt für eine Vielzahl an wissenschaftlichen Untersuchungen, die in eben dieser Kammer durchgeführt wurden [29] [30] [31] [32] [33] [34].

Die Nebelkammer ist in eine Hauptmesskammer und einen Tag/Nacht - Bereich unterteilt. Für die Messung wurde die 15,0 m lange und 3,1 m Breite Hauptmesskammer genutzt. Die Länge des Messbereichs ist ausreichend, da die Phänomene in Bereichen der Beleuchtung mit dem Scheinwerfer untersucht werden, die sich unterhalb von 15 m Entfernung zum Scheinwerfer befinden. Der Untergrund besitzt eine leichte Wellenlängenabhängigkeit, die sich im Bereich des sichtbaren Spektrums im unteren einstelligen Prozentbereich bewegt [16]. Die Partikelgröße der Nebelpartikel beträgt im Mittel zwischen 1 und 10 μm , liegt auch teilweise darunter [28] [16], was den Partikeldurchmessern von realen Wasserpartikeln im Nebel entspricht [15] [23] [24] [25]. Die Tropfenverteilung mit 100 bis 1000 Tropfen pro cm^3 [28] [35] entspricht ebenso der von realem Nebel [35] [15] [23] [25] [24].

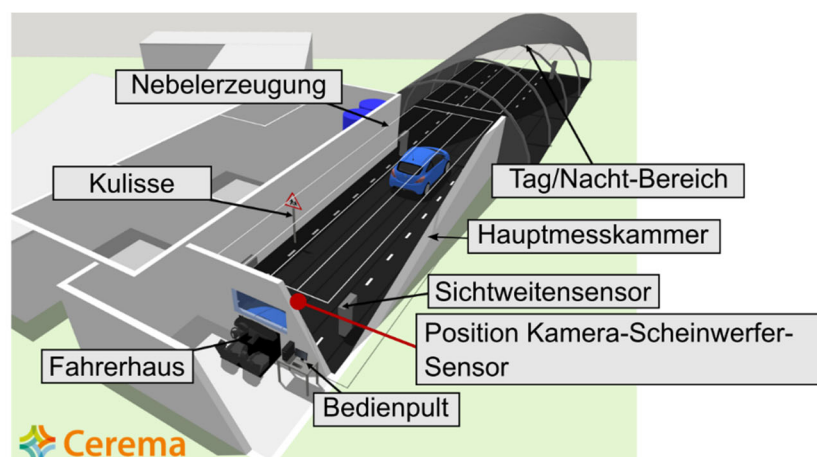


Abbildung 4 Die Nebelkammer der CEREMA in Clermont-Ferrand in Frankreich. Die Begriffe aus der Quelle wurden ins Deutsche übersetzt [35]

3.3 Versuchsdurchführung

Abbildung 5 stellt den Sichtweitenverlauf der Messung über die Zeit dar. Zu Beginn der Messung wurde die Nebelkammer auf 5 m Sichtweite eingeregelt und der Nebel über die Dauer von ungefähr 25 Minuten bis auf 2000 m aufgelöst. Dadurch wurden Schwankungen der Sichtweite über die Messung auf ein Minimum reduziert. Durch den Versatz zwischen dem Messbereich des Kamera-Scheinwerfer-Sensors und dem Sichtweitenmessgerät ist zusätzlich nur ein minimaler Unterschied in der Sichtweite zwischen den beiden Bereichen zu erwarten. Der Fokus bei den Untersuchungen liegt auf den Bereichen von 0 bis 1000 m Sichtweite, welcher der Definition der MOR entspricht [10].

Als Projektion wird im Falle des Scheinwerfers eine vollflächige Projektion mit Ausleucht winkeln von 15° horizontal und 10° vertikal verwendet. Es wäre aber auch ebenso eine klassische Abblendlichtverteilung möglich. Der Aufsetzpunkt der Projektion am Untergrund zum Lichtaustritt des Scheinwerfermoduls, also die Entfernung ab die selbige auf dem Boden leuchtet, beträgt knapp 5 m. Die Kamera wurde auf eine Belichtungszeit von 4 ms und einer Verstärkung von 9,5 dB bei 12 Bit Farbtiefe eingestellt. Bei Kameramodulen mit einer geringeren Empfindlichkeit sind ebenso höhere Belichtungszeiten möglich. Der Abstand zwischen jeder Messung beträgt 43 Sekunden.

Das Scheinwerfermodul wurde zur thermischen Stabilisierung zu Beginn der Messung für 10 Minuten auf volle Ausgangsleistung eingestellt. Die Temperatur der Kamera bewegte sich während der Messungen zwischen 49 und 50 °C, die Temperatur in der Nebelkammer stieg während der Messung in Abbildung 5 stetig von 16,1 auf 16,4 °C an.

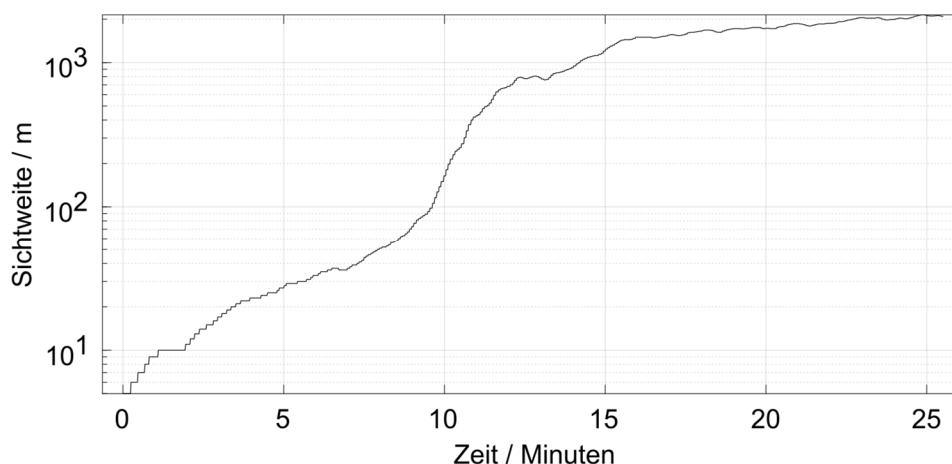


Abbildung 5 Der Verlauf der Sichtweite während der Messung in der Nebelkammer.

3.4 Segmentierung der Messbereiche

Da sich die Bereiche, welche die Kamera erfasst, voneinander unterscheiden, findet im Folgenden eine Segmentierung der Kameraaufnahmen statt. Abbildung 6 deutet

den Sichtbereich der Kamera an. Zu erkennen ist ein Bereich, in dem die Projektion des Scheinwerfers auf den Untergrund auftritt. Der Aufsetzpunkt befindet sich rund 5 m vom Lichtaustritt des Scheinwerfers entfernt, damit selbiger bereits bei minimaler Sichtweite in den Daten sichtbar ist. Der Bereich darüber wird als Luft-Boden-Bereich, der Bereich darunter als Luft-Bereich definiert. In dem Luft-Bereich erfasst die Kamera die Streuung in der Luft, in dem Luft-Boden-Bereich sowohl die Streuung in der Luft als auch die Reflexion am Untergrund, die für eine zusätzliche Streuung in der Luft sorgt.

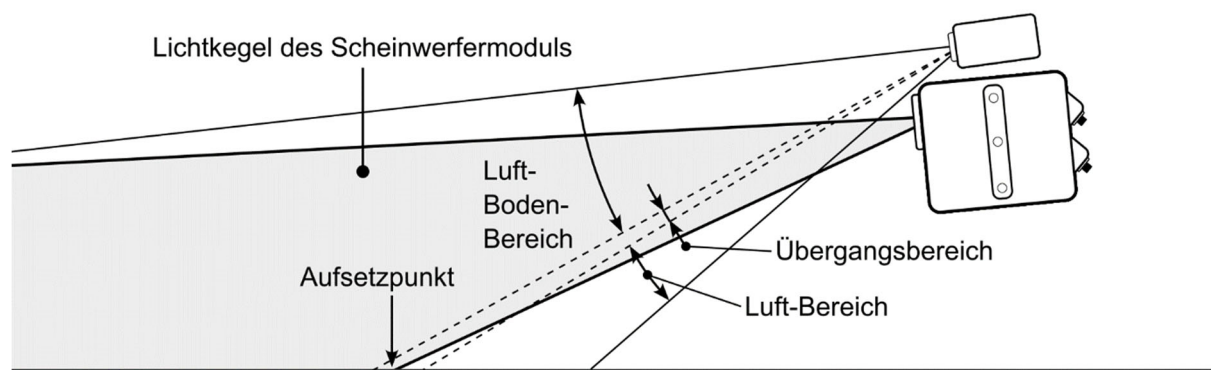


Abbildung 6 Unterteilung der Untersuchungsbereiche in den Luft-, Luft-Boden- und Übergangsbereich.

Abbildung 7 zeigt auf der rechten Seite die Auswertebereiche, die aus den Kameradaten extrahiert werden, neben den Intensitätswerten der Streuung des angeschalteten Scheinwerfermoduls. Hier ist zusätzlich ein Übergangsbereich angegeben, in dem die zuvor erwähnte Scheinwerferprojektion am Aufsetzpunkt auf dem Boden auftritt. Um den Effekt der Reflexion am Untergrund im Luft-Bereich weiter zu minimieren, wurde der Luft-Bereich daher verkleinert. Der Bereich wurde zudem so gewählt, dass die die Streuung im Zentrum der Projektion ausgewertet wird, um Effekte der Randbereiche zu ignorieren.

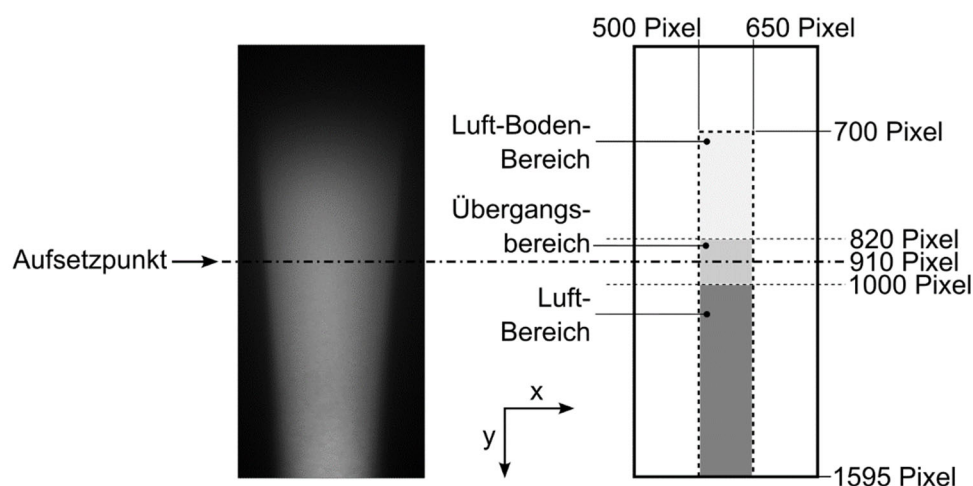


Abbildung 7 Segmentierung der durch die Kamera erfassten Bilddaten.

3.5 Theoretische Betrachtung

Für die theoretische Betrachtung wird nachfolgend die Veränderung über den in den Grundlagen zur Streuung eingeführten Extinktionskoeffizienten σ_e auf das eingemessene LED-Spektrum betrachtet.

Dazu wird das Spektrum des LED-Scheinwerfer mit dem Minimum ($\lambda^{-1,0}$) und dem Maximum ($\lambda^{-1,5}$) der Proportionalität gewichtet. Die Verläufe werden im Anschluss jeweils auf den maximalen Wert einer jeden Verteilung nahe der Wellenlänge von 400 nm normiert. Die Abbildung 8 zeigt diese Verläufe. Zu erkennen ist, dass die langwellige Strahlung im Vergleich zur kurzwelligen weniger stark gestreut wird, deren Intensität hier entsprechend abfällt. Das hat zur Folge, dass demnach der langwellige rote Wellenlängenbereich, bei der Kamera, also der Rotkanal, höhere Intensitäten erfahren würde.

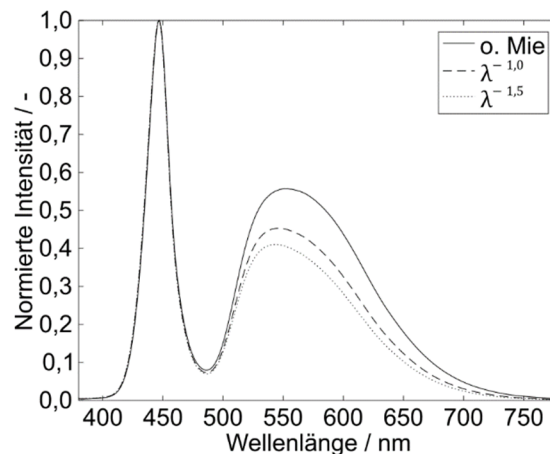


Abbildung 8 Der spektrale Verlauf des LED-Spektrums ohne der Proportionalität nach der Mie-Theorie (o. Mie) das zusätzlich mit der Proportionalität $\lambda^{-1,0}$ und $\lambda^{-1,5}$ gewichtet wird.

Um das zu überprüfen, findet ein Vergleich der jeweiligen Spektren in Abbildung 8 mit den Farbkanälen der Kamera statt. Dazu werden die Farbkanäle der Kamera, inklusive dem zuvor durchgeführten Weißabgleich, jeweils mit den drei unterschiedlichen LED-Spektren gewichtet. Darüber sollen die Unterschiede der Intensitäten berechnet werden, die durch die Veränderungen basierend auf der Streutheorie je Farbkanal der Kamera zu erwarten sind. Es wird also überprüft, ob die spektralen Veränderungen entsprechend der Theorie, von der Kamera erfasst werden können.

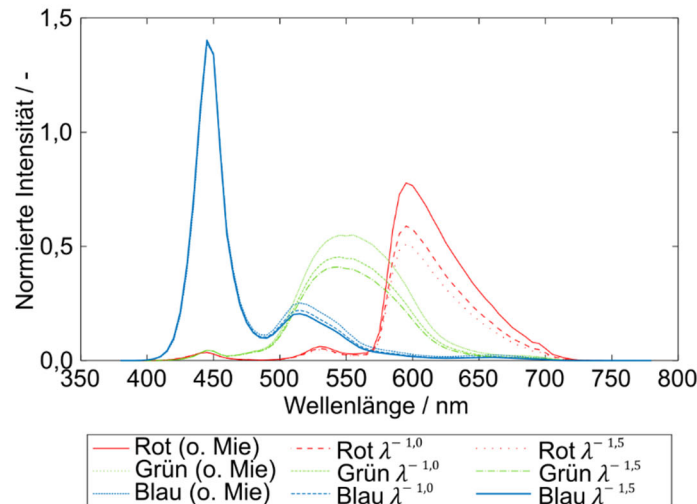


Abbildung 9 Die mit den LED-Spektren gewichteten Farbkanäle der Kamera.

Damit die grafische Darstellung in vergleichbare Zahlenwerte überführt wird, sind die Integrale der jeweiligen Kurvenverläufe je Farbkanal in der Tabelle 1 dargestellt. Die Integrale werden nach der Berechnung jeweils mit dem Blaukanal normiert, um die prozentuale Abweichung zwischen den Farbkanälen bei jeder Proportionalität zu erhalten. Bei den Werten ohne Berücksichtigung der Mie-Theorie sind bereits Abweichungen zu erkennen, was mit Ungenauigkeiten bei der spektralen Vermessung der Kamera, der spektralen Vermessung des Scheinwerfermoduls oder der Ermittlung des Weißabgleichs zusammenhängen kann. Die Korrektur der Integralwerte des Einflusses durch eine einfache Multiplikation der ist ohne weiteres nicht möglich, weil dabei die spektrale Verteilung nicht berücksichtigt werden kann. Durch die Integration ist die spektrale Verteilung in den Daten bereits nicht mehr vorhanden. Eine Korrektur der Spektren in Abbildung 2 oder Abbildung 3 wäre zudem beliebig, da der Fehler je Wellenlängenbereich unterschiedlich stark ausfallen kann. Generell lassen sich nach der Theorie jedoch große spektrale Einflüsse des gestreuten Lichtes auf die Farbkanäle der Kamera erkennen. Selbst wenn der Fehler beispielsweise mit 5 bis 6 % über den kompletten Wellenlängenbereich angenommen werden würde, so wäre der Einfluss nach wie vor vorhanden. Um die am weitesten voneinander entfernten Wellenlängenbereiche miteinander zu vergleichen, werden die Intensitäten der Blaukanals von denen des Rotkanals subtrahiert. Selbst bei der geringsten Proportionalität von $\lambda^{-1,0}$ wäre demnach eine Abweichung von rund 20 % (100 % - (74 % + 6 %)) zwischen der Intensität der beiden Farbkanäle zu erwarten. Bei $\lambda^{-1,5}$ würde der Unterschied bereits bei bis zu 29 % (100 % - (65 % + 6 %)) liegen.

Tabelle 2 Integrale der Kurvenverläufe der mit den LED-Spektren gewichteten und dem Weißabgleich korrigierten Farbkanälen der Kamera.

Farbkanal	Kamera (o. Korrektur)
Rotkanal (o. Mie)	95 %
Grünkanal (o. Mie)	94 %

Blaukanal (o. Mie)	100 %
Rotkanal $\lambda^{-1,0}$	74 %
Grünkanal $\lambda^{-1,0}$	80 %
Blaukanal $\lambda^{-1,0}$	100 %
Rotkanal $\lambda^{-1,5}$	65 %
Grünkanal $\lambda^{-1,5}$	74 %
Blaukanal $\lambda^{-1,5}$	100 %

Es gibt jedoch Effekte, die den durch die Kamera erfassbaren spektralen Einfluss der Streuung in den Daten dämpfen können. Davon werden im Folgenden basierend auf der Literatur einige Vermutungen aufgestellt:

1. Winkelabhängigkeit der Streuung
2. Durchdringung der gestreuten Strahlung bis zur Kamera
3. Zu starke Vereinfachung des Streuprozesses

Winkelabhängigkeit – Die gestreute Strahlung besitzt je Raumrichtung unterschiedlich hohe Intensitäten. Im Falle der Mie-Streuung ist die Streuung in Vorwärtsrichtung, also in Richtung, in welche der Scheinwerfer strahlt, besonders stark. Das hat zur Folge, dass die Streuung, welche die Kamera erfasst, deutlich geringere Intensitäten besitzt. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass sich der spektrale Effekt in Richtung der Kamera aufgrund der generell geringeren Intensitäten weniger stark ausprägen kann.

Durchdringung – Die gestreute Strahlung erfährt bei der Durchdringung in Richtung der Kamera eine Mehrfachstreuung an den Aerosolpartikeln in der Luft, wie die Abbildung 10 anhand der beiden eingezeichneten Strecken zeigt. Demzufolge wird die gestreute Scheinwerferstrahlung in Richtung der Kamera mehrfach gestreut. Das hat zur Folge, dass der kurzwellige blaue Wellenlängenbereich zwar stärker gestreut wird, die stärkere Durchdringung der langwelligen Anteile wiederum dafür sorgen kann, dass der rote spektrale Anteil von der Kamera als stärker aufgenommen wird.

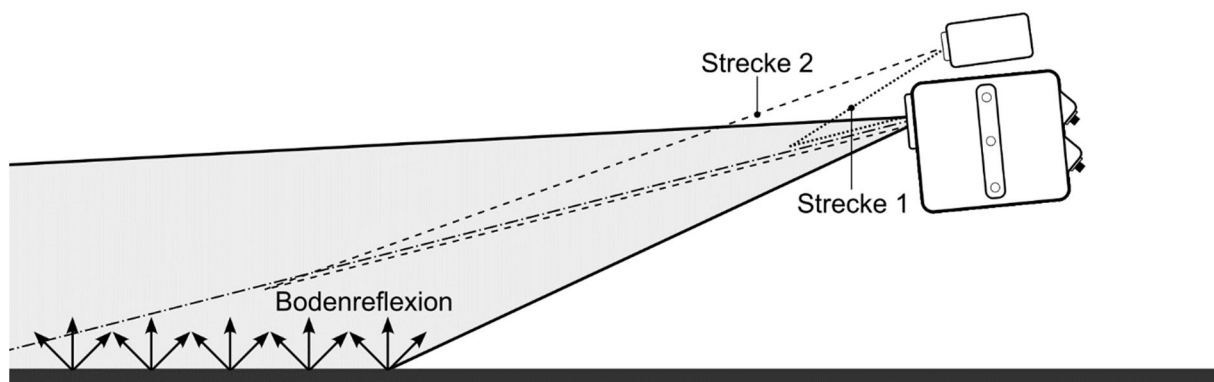


Abbildung 10 Zwei Beispiele für Strecken welche die vom Scheinwerfermodul ausgesandte Strahlung sowie die Streuung am Aerosol in Richtung der Kamera zurücklegen muss, bis sie auf den Sensor der Kamera trifft.

Vereinfachung – Die starke Vereinfachung der Proportionalität kann ebenso einen Einfluss auf den Effekt haben. Wie bereits zuvor bei der Erläuterung der Nebelkammer erwähnt, gibt es in der Realität je nach Tageszeit und Ort unterschiedliche Partikeldurchmesserverteilungen. Das hat zur Folge, dass die Partikeldurchmesser, zu denen in der Mie-Theorie beschriebenen stark abweichen können. Ebenso setzt sowohl die Mie- als auch die Rayleigh-Theorie die Einfachstreuung voraus, wohingegen bei Nebel eine Mehrfachstreuung zu erwarten ist. All das kann zu einer Dämpfung des Effektes führen.

3.6 Messung

Die theoretische Betrachtung lässt erwarten, dass die Unterschiede bezüglich der spektralen Intensitäten der Streuung zwischen dem Rot- und Blaukanal der Kamera im Minimum bei ungefähr 20 % liegen. Dementsprechend wäre zu erwarten, dass die spektrale Abweichung über die Kamera messtechnisch erfassbar und für die Sichtweitenbestimmung nutzbar sein sollte.

Im Folgenden wird daher die theoretische Betrachtung über die experimentelle Untersuchung in der Nebelkammer überprüft. Um die Streuung in der Luft zu untersuchen, werden dazu die Mittelwerte der Pixelwerte des Luft-Bereichs entsprechend der Abbildung 6 gebildet.

Abbildung 11 zeigt die Bildverarbeitungsschritte, die für den spektralen Vergleich des Kamera-Scheinwerfer-Sensors angewendet werden. Die Pixelwerte erfahren eine zusätzliche Verstärkung, sodass sie den Wertebereich bis 16 Bit möglichst vollständig abdecken. Auch wenn dadurch das Rauschen des Sensors mit verstärkt wird, welches durch die Gauß-Filterung ausgeglichen wird, werden so Artefakte durch die in der Arbeit genutzten Filterungen und Bildverarbeitungsverfahren bei zu geringen Pixelwerten minimiert.

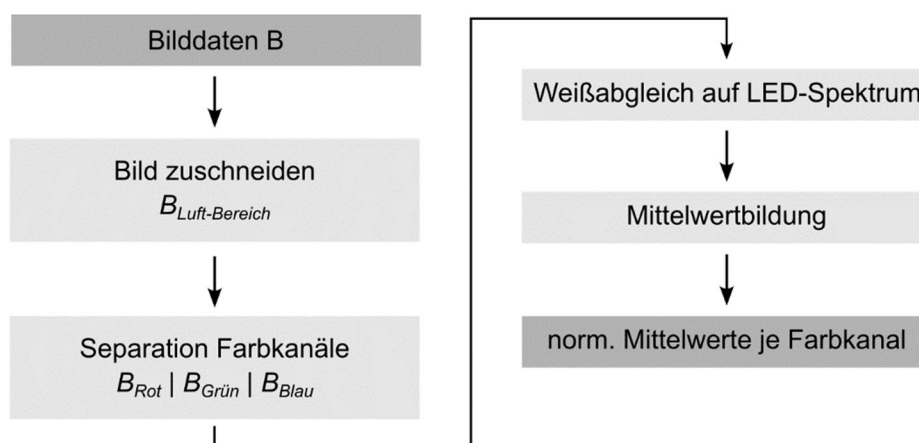


Abbildung 11 Berechnungsschritte für die Auswertung der Intensitäten innerhalb der experimentellen Untersuchung.

Die Mittelwerte der Luft-Bereiche der jeweiligen Farbkanäle sind in Abbildung 12 (a) über eine Sichtweite von 0 bis 1000 m dargestellt, was der Definition der maximalen

Sichtweite für Nebel nach der MOR entspricht. Der Luft-Bereich wird aufgrund seines vermeintlich geringen Bodeneinflusses gewählt. Die kurzen Antworten auf die zuvor gestellten Fragen lauten wie folgt:

1. Nein, die spektralen Unterschiede aus der Theorie lassen sich in der Praxis nicht in einem zur Sichtweitenbestimmung nutzbaren Umfang erkennen.
2. Ja, den Intensitätsverlauf der Streuung nach dem Bouguer-Lambert-Gesetz kann man in den Daten nachvollziehen.
3. Ja und nein, für die spektrale Analyse lassen sich die Hardwarekomponenten scheinbar nicht nutzen, für die Messung der Intensität der Streuung sehr wohl.

Die detaillierte Erläuterung folgt über die nun folgende Analyse der Messergebnisse.

Den Daten lässt sich entnehmen, dass die Intensitätsverläufe aus beiden Kameraperspektiven dem entsprechen, was über das Bouguer-Lambert-Gesetz, bezogen auf die Streuung im Nebel beschrieben wird. Markant ist hier der Verlauf der Intensität der Streuung, ähnlich einer Eulerschen Zahl mit negativen Exponenten, entsprechend der Gesetzmäßigkeit. Der Verlauf wird über die gestrichelte Linie in den Diagrammen angedeutet. Da dieser der Gesetzmäßigkeit nahe ist, deutet sich an, dass der Einfluss durch den Untergrund gering zu sein scheint.

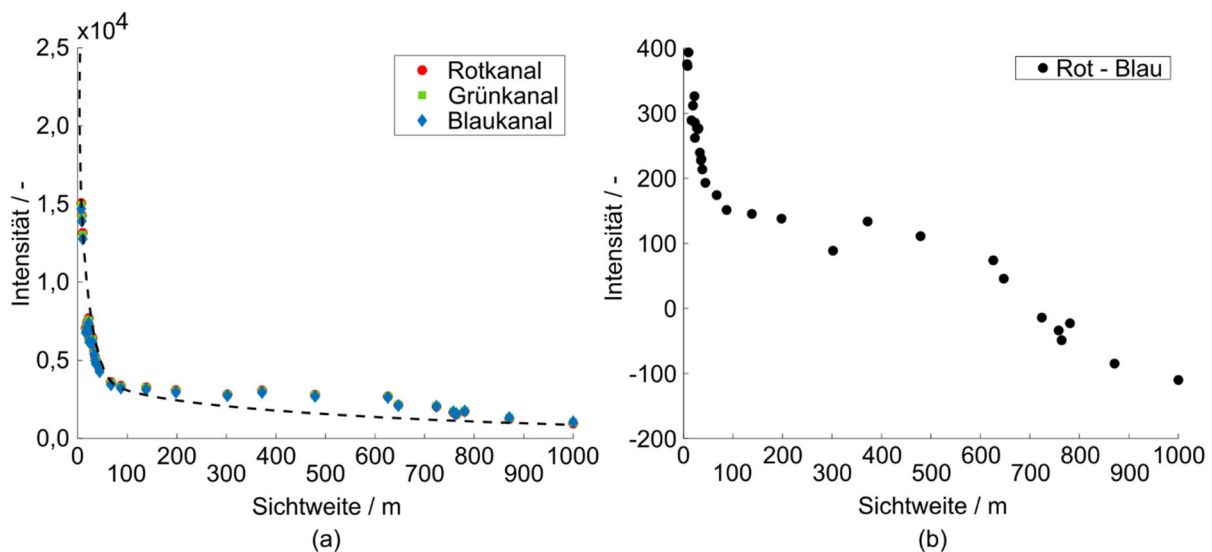


Abbildung 12 Mittelwerte der Luft-Bereiche (a) der Farbkanäle der Kamera mit dem angedeuteten Intensitätsverlauf nach dem Bouguer-Lambert-Gesetz und (b) die Differenzen des Rot- und Blaukanals.

Es lassen sich zusätzlich spektrale Unterschiede der Intensitäten der Streuung erkennen. Die Unterschiede bewegen sich im einstelligen Prozentbereich und sind über die Differenzen der Intensitäten der Farbkanäle in den Diagrammen in der Abbildung 12 (b) dargestellt. Für den spektralen Vergleich werden die Mittelwerte der Pixelwerte des Blaukanals von denen des Rotkanals subtrahiert. Den Diagrammen lässt sich entnehmen, dass der langwellige rote Anteil höhere Intensitäten aufweist, die Differenz daher positiv ist. Grund dafür könnte die stärkere Durchdringung der

langwelligen Strahlung sein. Zwar werden die kurzwelligen Bestandteile der Strahlung entsprechend der Theorie stärker gestreut, jedoch kommt hier die zuvor beschriebene Dämpfung in Richtung der Kameras zum Tragen. Steigen die Sichtweiten weiter an, drehen sich die Verhältnisse, sodass der Blaukanal höhere Intensitäten besitzt als der Rotkanal. Das könnte damit begründet werden, dass die Mehrfachstreuung der bereits aus dem Scheinwerferlichtkegel gestreuten Strahlung in Richtung der Kamera geringer ausfällt, die Wellenlängenselektivität in der Streuung also erhalten bleibt.

Ein weiterer Grund könnte die Veränderung der Partikeldurchmesserverteilung sein. Bei zunehmender Sichtweite könnten die Wasserpartikel mit großem Durchmesser bereits vermehrt zu Boden gesunken sein. Das kann zu im Mittel Partikeln mit geringerem Durchmesser führen, wodurch die Wellenlängenselektivität der Rayleigh-Theorie stärker zum Tragen kommt. Die Unterschiede zwischen den Wellenlängen wären demnach erheblich größer, wodurch der Blaukanal stärker verstärkt wird. Die Verhältnisse zwischen den beiden Farbkanälen schwanken zudem nicht, sondern verändern sich kontinuierlich. Danach würde sich der Intensitätsverlauf zur Sichtweitenbestimmung eignen, die spektralen Unterschiede aufgrund des geringen Unterschiedes wiederum weniger. Die theoretisch starken spektralen Effekte können in den Messdaten also nicht nachgewiesen werden.

Neben den zuvor beschriebenen Betrachtungen beschäftigen sich die folgenden Abschnitte mit ortsdiskreten Änderungen der Intensitäten und jeweiligen Spektren. Wurden bei den zuvor durchgeführten Betrachtungen noch alle räumlichen Informationen durch die Mittelwertbildung der gesamten Betrachtungsbereiche eliminiert, bleibt im Folgenden eine zusätzliche Dimension erhalten. Es werden im Kamerabild die Pixelwerte entlang der x-Achse gemittelt (vgl. Abbildung 7). Dadurch erhält man einen Intensitätsverlauf entlang der Tiefe beziehungsweise y-Achse des Bildes je Farbkanal. So können räumliche Unterschiede der Streuung untersucht werden.

Die Bildverarbeitung entspricht der aus der Abbildung 11, wobei hier die zuvor erwähnte andere Mittelwertbildung entlang der x-Achse durchgeführt wird. Zudem wird auf die Bilddaten ein Gauß-Tiefpassfilter mit einer Standardabweichung von $\sigma = 10$ angewendet, um mögliches Rauschen herauszufiltern.

Abbildung 13 skizziert mögliche Phänomene der Streuung in der Luft und der Reflexion am Untergrund. Der Nebel sorgt dafür, dass der Lichtkegel des Scheinwerfermoduls in die Breite gestreut wird. Gleichzeitig kommt es zur Reflexion der Strahlung am Untergrund. Der größere Lichtkegel sollte für eine Verschiebung des Aufsetzpunktes auf dem Untergrund sorgen. Die in der Literatur beschriebenen asymmetrische Rückreflexion am Untergrund ist hier ebenfalls angedeutet [11] [36] [37] [38] [39].

Während der Messung sollte die asymmetrische Verteilung bis auf die Veränderung der Intensität gleichbleiben, da sich der Untergrund nicht verändert. Das alles lässt erwarten, dass es zu einer Verschiebung des Intensitätsmaximums aus Sicht der Kameras kommt. Zusätzlich könnten die Wellenlängenabhängigkeit und die spektralen

Unterschiede in der Projektion eine Verschiebung der Maxima der Intensitäten in der Streuung hervorrufen. In der Abbildung ist zusätzlich eine Bildebene der Kamera angedeutet.

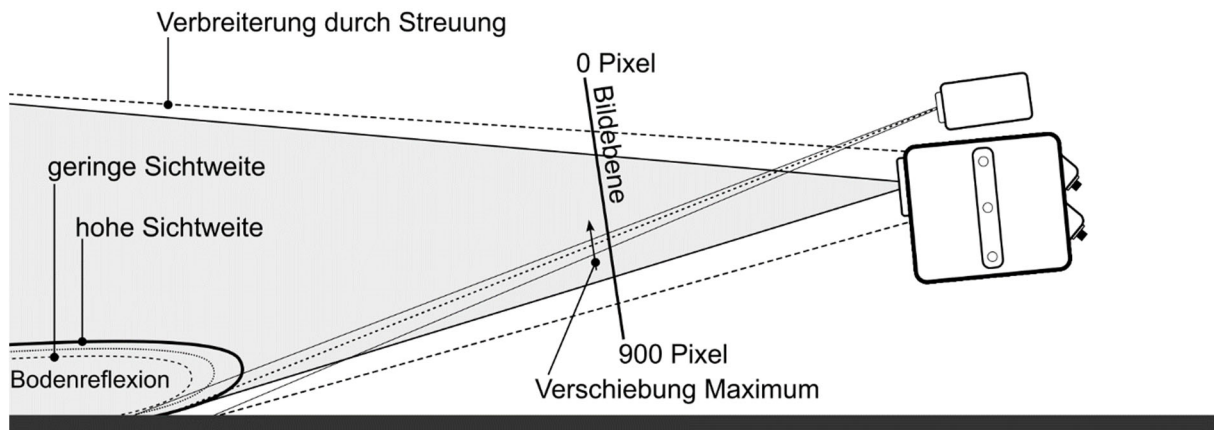


Abbildung 13 Mögliche Effekte die bei der Streuung in der Luft und der Reflexion am Untergrund auftreten können.

Hier dargestellt ist die erwähnte Mittelwertbildung der Intensitäten im Kamerabild entlang der x-Achse. Es sind Intensitätsverteilungen für Sichtweiten zwischen 7 und 87 m dargestellt, da die Unterschiede hier vermeintlich am höchsten sind (vgl. Abbildung 12 (b)). Bei jeder Sichtweite sind die aus den zuvor beschriebenen Gründen höheren Pixelwerte des Rotkanals zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich hier mit abnehmender Sichtweite der Aufsetzpunkt der Projektion auf dem Boden ausbildet, da die Intensitätsmaxima der Reflexion näher in Richtung Aufsetzpunkt wandern. Deutete sich das Maximum bei 10 m noch bei Pixelreihe 1100 an, so wandert es mit Zunahme der Sichtweite in Richtung des Ursprungs der y-Achse. Zudem liegen die Maxima der jeweiligen Farbkanäle nicht übereinander.

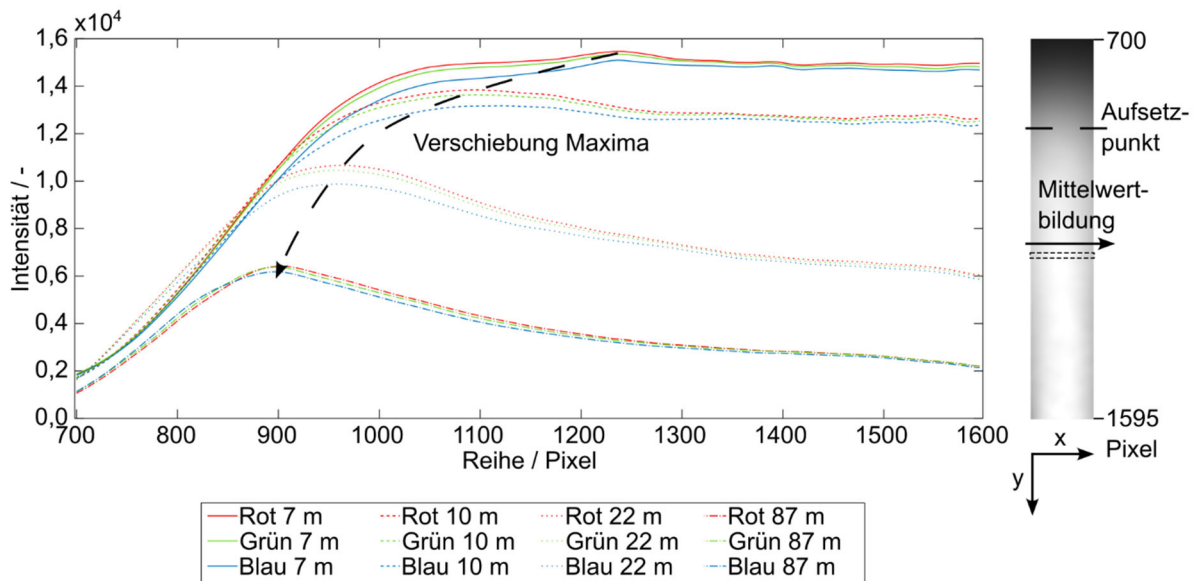


Abbildung 14 Spektrale Intensitätsverläufe inklusive der Verschiebung der Maxima bei unterschiedlichen Sichtweiten. Auf der rechten Seite ist eine Intensitätsverteilung des Grünkanals bei der Sichtweite 6 m dargestellt. Der Aufsetzpunkt liegt bei 910 Pixel.

Schaut man sich den räumlichen Verlauf, wie in Abbildung 14 dargestellt, an, ist eine Verschiebung der Intensitätsmaxima in Richtung Diagrammursprung, also entgegen der Position des Kamera-Scheinwerfer-Sensors zu erkennen. Der Wert 700 Pixel steht auf der y-Achse für den oberen (hinteren) und 1600 Pixel für den unteren (vorderen) Bildbereich.

Die unterschiedlichen Positionen der Maxima der drei Farbkanäle kann folgende Gründe haben:

1. Farbunterschiede/Farbsäume durch die verbauten Scheinwerferoptiken und das Spektrum der Lichtquelle
2. Farbsäume zwischen den einzelnen LEDs des Leuchtmittel
3. Einflüsse durch die Kameraoptik
4. Wellenlängenselektivität des Untergrundes
5. Wellenlängenselektivität der Streuung im Nebel

Die Farbunterschiede beziehungsweise Farbsäume durch die verbauten Scheinwerferoptiken und das Spektrum der Lichtquelle sind im Folgenden am wahrscheinlichsten einzustufen. Schaut man sich die spektrale Verteilung des LED-Spektrums in Abbildung 2 an, sieht man die Intensitätsunterschiede je Wellenlänge. Diese Farbunterschiede sorgen vermutlich zusammen mit den Farbsäumen für die Unterschiede in der Höhe der Maxima also der lokal unterschiedlichen Pixelwerte je Farbkanal.

Die Farbsäume zwischen den LEDs des LED-Arrays müssten sich über den kompletten Ausleuchtbereich zeigen, was hier in keinem ersichtlich hohen Anteil der Fall ist. Da es sich bei dem Kameraobjektiv um ein sehr hochwertiges handelt, ist auch

hier kein großer Effekt zu erwarten. Die Wellenlängenselektivität des Untergrundes bewegt sich im zuvor erwähnten Bereich von 1 – 2 % (langwellige Strahlung wird stärker reflektiert), was ebenfalls keinen ausschlaggebenden Einfluss hat. Die Wellenlängenselektivität der Streuung ist ebenfalls ein möglicher Grund.

Entgegen der Theorie scheinen die spektralen Unterschiede jedoch auch hier sichtbar geringer auszufallen. Interessanterweise gibt es die genannten räumlichen Veränderungen, die aufgrund der geringen Ausprägung jedoch nicht weiter im Detail betrachtet werden, da sie sich für die Bestimmung der Sichtweite durch die geringe Ausprägung nur schwierig zu eignen scheinen. Hier wäre eine generelle Bestimmung des Auftretens von Nebel denkbar.

4 Diskussion der Ergebnisse und Zusammenfassung

Die spektralen Unterschiede in den Messdaten lassen sich nur bedingt nachvollziehen. Die Frage, ob sich die spektralen Unterschiede aus der Theorie in den Messdaten finden, lässt sich also mit einem Ja und Nein beantwortet werden. Die hohen Unterschiede aus der Theorie lassen sich in der Praxis von der Kamera nicht erfassen. Kleine Unterschiede sind zu erkennen, bewegen sich jedoch im einstelligen Prozentbereich und eignen sich daher in der Realität vermutlich weniger für die Sichtweitenerfassung. Die spektralen Unterschiede in der Abbildung 14 sind in der 2D-Darstellung etwas größer, zeigen jedoch keinen offensichtlichen großen Unterschied zwischen den verschiedenen Sichtweiten. Es wäre jedoch ein Ausgangspunkt, um weitere Analysen bezüglich des Untergrundeinflusses durchzuführen.

Die Frage, ob man den Intensitätsverlauf, den das Bouguer-Lambert-Gesetz beschreibt, finden lässt kann bejaht werden. Das Diagramm in Abbildung 12 zeigt, dass sich die Formel der Gesetzmäßigkeit in den Daten nachvollziehen lässt. Sie entsprechen also dem, was über die MOR von der WMO für Sichtweitemessgeräte definiert wurde [10]. So kann die Streuung im Nebel durch den Scheinwerfer als Informationsquelle hier auch über eine monochrome Kamera nutzen. Ebenso lassen sich weitere Merkmale in den Intensitäten wie die Position des Intensitätsmaximums (vgl. Abbildung 14) nutzen, um darüber Sichtweiten im Bereich von 0 bis 100 m voneinander unterscheiden zu können.

Die Antwort darauf, ob sich Hardwarekomponenten nutzen lassen, die aktuell in den Fahrzeugen verbaut werden beziehungsweise es bereits sind, lässt sich ebenfalls nur mit einem Ja und einem Nein beantworten. Die spektralen Einflüsse sind geringer als aus der Theorie zu erwarten, lassen sich also nur bedingt nutzen. Da sich jedoch der Intensitätsverlauf unabhängig der spektralen Zusammensetzung als charakteristisches Merkmal herausgestellt hat, ließe sich jede im Fahrzeug verbaute Kamera, ebenso eine monochrome, nutzen, um diese Intensitäten zu detektieren. Dabei ist jedes Scheinwerfersystem geeignet, dessen spektrale Verteilung bekannt ist. Es wird ebenso kein Scheinwerfer mit einer besonders hohen Performance benötigt.

5 Ausblick

Für weitere Arbeiten an dem Thema wäre eine Durchführung von Messungen im realen Straßeneinsatz von Interesse. Es wäre zu überprüfen, wie sich andere Beleuchtungen auf die Messgröße auswirken. Insbesondere bei geringen Sichtweiten können diese anderen Strahlungsquellen eine hohe Streuung erfahren und dementsprechend das Scheinwerferlicht wenig beeinflussen. Das wäre ein Punkt dessen Untersuchung für die Systemumsetzung von großem Interesse ist.

Ebenso wäre die Untersuchung von unterschiedlichen Untergründen für die Überführung der Messung in der Nebelkammer und der theoretischen Betrachtung in die Realität sinnvoll. Insbesondere wenn sich der Boden durch die Benetzung durch Feuchtigkeit verändert und Spiegelungen zunehmen.

Der Effekt durch den dynamischen Fahrbetrieb wäre als gering einzustufen, da Kamera und Scheinwerfer in einem starren Abstand zueinander ausgerichtet sind. Es wäre der Effekt einer stärkeren Glättung zu erwarten. Ebenso bei einer erhöhten Belichtungszeit, wie es bei in aktuellen Fahrzeugen verbauten Kameras der Fall ist. Es müsste dabei der Effekt auf die Genauigkeit der Sichtweitenerfassung geprüft werden.

Für die weitere Nutzung des Scheinwerfers zur Sichtweitenerfassung im Bereich des automatisierten Fahrens wäre ebenso die Projektion von Mustern von Interesse und die Untersuchung von anderen Merkmalen des Nebels.

6 References

[1] T. W. Team, Next Stop for Waymo One: Los Angeles, WAYMO, 2022, URL: <https://blog.waymo.com/2022/10/nextstop-for-waymo-one-los-angeles.html> (besucht am 01.01.2023)

[2] V. Finkler, Autonomes Fahren für jeden: Tesla macht Beta-Software für alle Kunden verfügbar, EFAHRER, 2022, URL: https://efahrer.chip.de/news/autonomes-fahren-fuer-jeden-teslamacht-beta-software-fuer-alle-kunden-verfuegbar_1010407 (besucht am 15.12.2022)

[3] Drive Pilot kostet wenigstens 5.950 Euro, auto motor sport, 2022, URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/techzukunft/mercedes-autonom-level-3-drive-pilot-haftungunfall/> (besucht am 13.12.2022)

[4] Mercedes-Benz DRIVE PILOT, Mercedes-Benz, URL: <https://www.mercedesbenz.de/passengercars/technology/drive-pilot.html> (besucht am 23. 03. 2023)

[5] S. Bäumer. Lidar und Radar – künftig versteckt im Scheinwerfer, 2022, URL: <https://www.amz.de/lidar-und-radarkuenftig-versteckt-im-scheinwerfer> (besucht am 20.12.2022)

[6] P. Harry und W. Fellner, Lexikon der Optik: M bis Z, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2003

- [7] H. C. van de Hulst, Light Scattering by Small Particles, Dover Publications, Inc., New York, 1957
- [8] Unser "Digital Light SSL | HDLichtsystem: ein neuer Meilenstein der automobilen Lichttechnik, HELLA, 2019. URL: <https://www.hella.com/techworld/de/Lounge/Unser-Digital-Light-SSL-HD-Lichtsystem-ein-neuer-Meilenstein-derautomobilen-Lichttechnik-55548/> (besucht am 15.12.2022)
- [9] Digital Light: Millions of Pixels on the Road, AL, 2018. URL: <https://www.al.world/news/article/digitales-licht-millionenpixel-auf-der-strasse/?L=1&cHash=7a> (besucht am 01.01.2023)
- [10] World Meteorological Organization, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Organization, Geneva, 2008
- [11] R. Gibbons und W. Adrian, "Influence of Observation Angle on Road Surface Reflection Characteristics", Journal of the Illuminating Engineering Society, Taylor and Francis, London, S. 139–149 ,1997
- [12] J. P. Gehrke und P. Köberle, Moderne Physik: Von Kosmologie über Quantenmechanik zur Festkörperphysik, De Gruyter, Berlin, 2017.
- [13] W. Demtröder, Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2009
- [14] W. H. Greulich und U. R. Kilian, Lexikon der Physik: in sechs Bänden, Spektrum, Heidelberg, 2003
- [15] W. Roedel und T. Wagner, Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2011
- [16] P. Duthon, M. Colomb und F. Bernardin, "Fog Classification by Their Droplet Size Distributions: Application to the Characterization of Cerema's Platform", Atmosphere, Basel, S. 596, 2020
- [17] U. Slabke, LED-Beleuchtungstechnik: Grundwissen für Planung, Auswahl und Installation, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2018
- [18] World Meteorological Organization, International Meteorological Vocabulary, second edition, World Meteorological Organization, Geneva, 1992
- [19] H. R. Ris, Beleuchtungstechnik für Praktiker: Grundlagen, Lampen, Leuchten, Planung, Messung, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2019
- [20] G. A. Reider, Photonik: Eine Einführung in die Grundlagen, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2022
- [21] G. Kortüm und D. Oelkrug, "Über den Streukoeffizienten der Kubelka-Munk-Theorie", Zeitschrift für Naturforschung A, De Gruyter, Berlin, S.28–37, 1964
- [22] H. Hinzpeter und M. Schlegel, Strahlungstransporte in der Atmosphäre, promet, Deutscher Wetterdienst, 1985

- [23] E. J. McCartney, *Optics of the Atmosphere: scattering by molecules and particles*, John Wiley & Sons, New York, 1976
- [24] H. G. Houghton, “The Size and Size Distribution of Fog Particles”, *Journal of Applied Physics*, AIP Publishing, Melville, S.467-475, 1932
- [25] S. S. Muhammad, “Characterization of Fog Attenuation in Terrestrial Free Space Optical Links”, *Optical Engineering*, SPIE, Bellingham, S.066001, 2007
- [26] J. E. McCartney und F. Freeman, “Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles”, *Physics Today*, AIP Publishing, Melville, S.74-76, 1977
- [27] Datenblatt: Industriekameras / LX-Serie VLXT-71C.I – Baumer, Baumer, URL: https://www.baumer.com/medias/__secure__/Baumer_VLXT-71C.I_DE_20221110_DS.pdf?mediaPK=9056664289310 (Besucht am 17. 03. 2023)
- [28] S. Liandrat, P. Duthon, F. Bernardin, A. B. Daoued und J.-L. Bicard, “A Review of Cerema PAVIN Fog & Rain Platform: From Past and Back to the Future”, *TRANSFORMATION BY TRANSPORTATION, ITS WORLD CONGRESS*, Los Angeles, 2022
- [29] R. Gallen, A. Cord, N. Hautiere und D. Aubert, “Towards Night Fog Detection through Use of In-Vehicle Multipurpose Cameras”, *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Baden-Baden, S. 399–404, 2011
- [30] J. Dubbert, B. Müller und G. Meyer, *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2018: Smart Systems for Clean, Safe and Shared Road Vehicles. Lecture Notes in Mobility*, Springer International Publishing, Cham, 2019
- [31] T. Yang, Y. Li, Y. Ruichek und Z. Yan, “LaNoising: A Data-driven Approach for 903nm ToF LiDAR Performance Modeling under Fog”, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, S.10084–10091, 2020
- [32] M. Jokela, M. Kutila und P. Pyykönen, “Testing and Validation of Automotive Point-Cloud Sensors in Adverse Weather Conditions”, *Applied Sciences*, S. 2341, 2019
- [33] R. Gourova, O. Krasnov und A. Yarovoy, “Analysis of Rain Clutter Detections in Commercial 77 GHz Automotive Radar”, *2017 European Radar Conference (EURAD)*, 2017 European Radar Conference (EURAD), S. 25–28, 2017
- [34] Y. Li, P. Duthon, M. Colomb und J. Ibanez-Guzman, “What Happens for a ToF LiDAR in Fog?”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, S. 6670–6681, 2021
- [35] F. Bernardin, P. Duthon und J.-L. Bicard, *Fog & Rain Facility (Whitepaper)*, CEREMA, Clermont-Ferrand, 2020

- [36] I. Petrinska, D. Ivanov, D. Pavlov und K. Nikolova, “Road Surface Reflection Properties of Typical for Bulgaria Pavement Materials”, Lux Junior 2015, Ilmenau, 2015
- [37] B. Kleinert, C. Schierz, S. Völker und M. Marutzky, Anforderungen und Bewertungsmethoden für ein adaptives blendfreies Abblendlicht bei spiegelnden Fahrbahnoberflächen, Publikationsreihe des Fachgebietes Lichttechnik in Ilmenau Nummer 19, ilmedia, Ilmenau, 2017
- [38] C. Schulze, In Situ-Messungen von Reflexionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen, Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG, Bremen, 2023
- [39] Technical Report Road Lighting Calculations (CIE 140-2000), CIE, 2006
- [40] G. Kortüm, “Einfach- Und Mehrfachstreuung”, Reflexionsspektroskopie, Springer Berlin Heidelberg, S. 74–105, 1969
- [41] M. A. Maikowski, “Lichtabsorption in pigmentierten Schichten”, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, S. 313–326, 1967