

Einfluss der Wetterbedingungen auf LiDAR-Sensoren

Lucas Straßer
Technische Hochschule Ingolstadt
Matr.Nr.: 97115

Abstract - Die vorliegende Arbeit beginnt anfänglich mit der Motivation hinter der Forschungsfrage. Anschließend wird der aktuelle Stand der Technik beschrieben. Hierbei wird zunächst der Aufbau und die Funktionsweise von LiDAR-Sensoren erläutert. Hernach werden die Einschränkungen und Limitierungen behandelt. Darauf folgt die Konzeption. Dort betrachtet man zuerst die Grundlegende Dämpfung durch die Atmosphäre und die Interaktion zwischen Wassertropfen und elektromagnetischen Wellen. Danach wird jeweils die Dämpfung durch Nebel und durch Regen besprochen. Zum Schluss erfolgt noch eine Zusammenfassung mit einem zukünftigen Ausblick auf vielversprechende Ansätze.

I Einleitung

A Motivation

Laut dem *Allgemeinen Deutschen Automobil-Club e.V.* (ADAC) bringt das automatisierte und autonome Fahren Vorteile aus mehreren Blickwinkeln. Aus Sicht der Gesellschaft bietet sich die Chance, ältere beziehungsweise leistungseingeschränkte Menschen besser einzubinden, indem man ihnen Zugang zu mehr Mobilität ermöglicht. Aus sicherheitstechnischer Sicht werden die Unfallzahlen sinken, denn für immerhin 90% aller Unfälle ist menschliches Versagen verantwortlich. Das autonome Fahren hat auch einen Mehrwert für die Umwelt, da hier die Ressourcen effektiver genutzt werden können. [1]

Experten des Forschungsinstituts *Prognos AG* prognostizieren, dass sich das autonome Fahren auf lange Sicht durchsetzen wird. So werden voraussichtlich im Jahr 2050 rund die Hälfte aller Pkws über eine Automatisierungsfunktion verfügen. Dies bedeutet dann allerdings noch nicht, dass alle eben genannten Fahrzeuge bis dahin vollständig autonom fahren werden. Diese Kraftfahrzeuge wirken sich anschließend positiv auf die Unfallstatistik aus, zunächst dennoch erst auf die Sachschäden. Mit steigendem Anteil der vollständig autonomen Fahrzeuge, macht sich in Folge dessen auch ein Einfluss auf die Anzahl der tödlich endenden Verkehrsunfälle bemerkbar. [9]

In Abbildung 1 sieht man die Anzahl der tödlich verunglückten Verkehrsteilnehmer seit 1950. Verglichen mit den Höchstständen der 70er-Jahre sind die aktuellen Zahlen deutlich niedriger. Seit dem Jahre 1991 sinken die Zahlen relativ konstant, bis auf ein paar Ausnahmen. Ziel bleibt jedoch die sogenannte *Vision Zero*. Das bedeutet, dass kein einziger Verkehrsteilnehmer mehr tödlich im Straßenverkehr verunglückt.

Ein Grund für die konstant sinkenden Zahlen sind

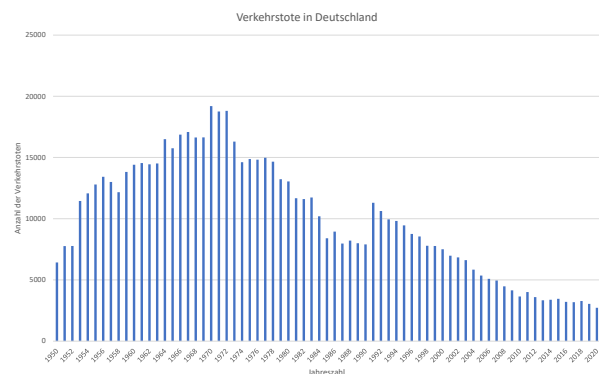


Abbildung 1 Anzahl der Verkehrstoten vgl. [9]

unter anderem die Fahrerassistenzsysteme. Dies liegt daran, dass die Leistungsfähigkeit eines computergestützten Sicherheitssystems auch nach mehrstündiger Fahrt, im Gegensatz zu der des Menschen, nicht abnimmt. Deshalb bilden solche Systeme eine zentrale Rolle in der Unfallvermeidung. Neufahrzeuge werden immer häufiger serienmäßig mit diesen Hilffsystemen ausgerüstet. Deren Performance, nebenbei gesagt, immer besser wird. Aber nur Fahrerassistenzsysteme werden nicht ausreichen, um die *Vision Zero* zu erreichen. Hierfür wird das autonome Fahren von großer Bedeutung sein. Die Sensorart LiDAR spielt sowohl bei den Fahrerassistenzsystemen, als auch beim autonomen Fahren eine entscheidende Rolle. Die Weiterentwicklung und Zuverlässigkeit dieser beiden fahrunterstützenden Techniken hängt auch sehr eng mit der Entwicklung von den LiDAR-Sensoren zusammen. Daraus ergibt sich, dass die Systeme auch bei schlechten Wetterbedingungen Objekte sicher erkennen müssen. Tritt dieser Fall nicht ein, dann kann das für den Fahrer verheerende, gar tödliche Folgen haben. Wenn

der Fahrzeugführer nämlich mit seinem Fahrzeug bei schlechtem Wetter unterwegs ist, hat dies einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von LiDAR-Sensoren und damit auch auf die Funktionsfähigkeit der Fahrerassistenzsysteme.

B Forschungsfrage

Wie man sieht, sind Fahrerassistenzsysteme und auch das autonome Fahren in der Zukunft von größter Wichtigkeit. Dies führt dazu, dass die Umfelderkennung, in jeder Wetterlage, fehlerfrei funktionieren muss. Da LiDAR bei solchen Systemen in Zukunft eine wichtige Rolle spielen wird, stellt sich mir die Frage: Wie wird LiDAR durch Wetterbedingungen beeinflusst? Die folgenden Kapitel gehen dieser Frage nach.

II Stand der Technik

A Aufbau & Funktionsweise von LiDAR-Sensoren

LiDAR kam zuerst in der Meteorologie für die Wolkenmessung zum Einsatz. Ausgeschrieben bedeutet es *Ligh Detection And Ranging*, hierbei handelt es sich um ein optisches Messverfahren. Da diese Sensoren ihren Messstrahl selbst erzeugen, spricht man von einem aktiven Messsystem. LiDAR-Sensoren können zur Erfassung einer Distanz oder dem Umfeld des Sensors verwendet werden. Erfassen diese Sensoren das Fahrzeugumfeld, spricht man von einem 360°-LiDAR. Das Funktionsprinzip ist ähnlich dem von Radarsystemen. Allerdings liegt der Laserstrahl, mit dem gemessen wird, im ultravioletten, infraroten oder sichtbaren Bereich des Lichts. [10]

Vergleicht man LiDAR-Systeme mit dem menschlichen Körper, dann steht der Mikrocontroller, der für die Auswertung des Signals zuständig ist, für das Gehirn. Die Linse entspricht in diesem Fall den Nerven, sie erfasst die Informationen des Umfeld. Besonders die Größe und Qualität der Linse ist für die Performance des LiDAR von extremer Wichtigkeit, denn von einer Millionen ausgesendeten Photonen kommt durchschnittlich nur ein Photon zurück. Aufgrund dessen ist es unumgänglich, dass dieses ein Photon auch erfasst wird. Ist ein Objekt weniger als zehn Meter von der Linse des Sensors entfernt, hält es sich im sogenannten Nahfeld auf. Mit Hilfe von LiDAR-Systemen lässt sich auch ein dreidimensionales Bild des Fahrzeugumfelds erstellen. Man spricht dann umgangssprachlich von einer Punktwolke. [4]

Der Aufbau von LiDAR besteht aus einer Sendeeinheit (Laserdiode), einer Ablenk- (Umlenkspiegel) und einer Empfangseinheit (Photodiode) (vergleiche Abbildung 2). Der Umlenkspiegel rotiert um eine horizontale Achse, dadurch kann eine Ebene des Raums erfasst werden.

Die Photodiode emittiert einen Laserstrahl, dieser

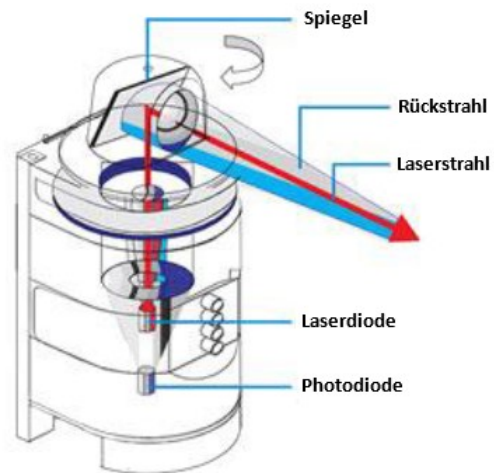


Abbildung 2 Aufbau eines LiDAR-Sensors vgl. [10]

wird am Umlenkspiegel um 90° abgelenkt und in den Raum geworfen. Dort trifft er auf ein Objekt, von dem er anschließend reflektiert wird. Am Subjekt wird der Strahl teilweise gestreut, dies führt zu einer Abschwächung des Signals. Der abgeschwächte zurückgeworfene Laserstrahl tritt durch die Linse in den Sensor ein und wird am Umlenkspiegel in die Photodiode gelenkt. Hier detektiert man den empfangene Strahl und wertet ihn aus. Mit Hilfe einer schnellen Elektronik lässt sich das Signal dann filtern und die Zeit, die zwischen Senden und Empfangen liegt, ermitteln. Hierfür kommt die sogenannte *Time Of Flight*-Methode zum Einsatz, welche in Formel 1 beschrieben ist. [10]

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (1)$$

Mit Hilfe dieser Formel lässt sich die Distanz d zum detektierten Objekt bestimmen. Grundlage ist dabei die Lichtgeschwindigkeit c , die mit 299 792 Kilometer pro Sekunde konstant ist. Da der durch die Laserdiode emittierte Laserstrahl den Weg, vom Sensor zum erfassten Körper hin und wieder weg von ihm, zurücklegt, muss dies mit der Division durch 2 berücksichtigt werden. [13]

Es ist von sehr großer Wichtigkeit, dass extrem kleine Zeitunterschiede, im Bereich von einigen Pikosekunden, vom System aufgelöst werden. Ist dies nicht der Fall, dann kann die Genauigkeit von einigen Millimetern nicht gewährleistet werden. Bei autonomen Fahrzeugen führt dies eventuell zu verheerenden Folgen, sowohl für den Fahrer als auch andere Verkehrsteilnehmer. [5] [10]

B Einschränkungen & Limitierungen von LiDAR

So vielversprechend die Zukunft von LiDAR auch scheinen mag, gibt es doch noch Probleme und Li-

mitierungen dieser Technik. Diese beschränken sich allerdings nicht nur auf die Wetterbedingungen. Da wäre zum einen der mechanische Verschleiß, den aktuell verwendete LiDAR-Systeme noch aufweisen. Durch die Rotation des Spiegels an der horizontalen Achse und der dadurch entstehenden Reibung ist eine Abnutzung und daraus folgender Ausfall des gesamten Systems, nach einer gewissen Zeit, unausweichlich. Hier gibt es bereits erste Lösungsansätze, wie beispielsweise das Solid-State-LiDAR. Jedoch ist noch kein massenmarktaugliches Produkt in Sicht. Ein weiteres Problem ist die Kühlung der LiDAR-Systeme, vor allem bei Dauerbetrieb. Wird LiDAR zur 360°-Umfelderfassung verwendet, dann ist das System mindestens die ganze Fahrtzeit im Betrieb. Es ist entsprechend schwer eine Kühlung des Messsystems ins Fahrzeug zu integrieren, da bei der Konstruktion von Autos wenig bis gar kein Platz mehr vorhanden ist. Bei Testläufen mit 360°-LiDAR kommt es, wegen der fehlenden Kühlung, immer wieder zur Überhitzung und einem daraus resultierenden Ausfall des Systems. Zuletzt kann das LiDAR noch durch Rauschen von anderen Sensoren oder der Sonne beeinflusst werden. Dies lässt sich jedoch durch entsprechende Filterung eindämmen. [4]

Abgesehen von den technischen Herausforderungen, gibt es auch noch andere Problemstellungen. Hier wäre zum einen der aktuell noch sehr hohe Preis zu nennen. Dieser macht LiDAR, speziell für den Automobilsektor, unattraktiv. Hier ist nämlich ein niedriger Stückpreis unabdingbar. Doch mit der weiteren Erforschung dieser Technik wird auch der Preis höchst wahrscheinlich sinken. Ein weiteres Problem stellt die Bauform aktueller 360°-LiDAR-Sensoren dar. Da sie aktuell noch zu groß sind und aus technischer Sicht mittig auf dem Fahrzeugdach angebracht werden müssen. Dies ist Voraussetzung um das Umfeld des Kraftfahrzeugs vollständig erfassen zu können. Aufgrund dessen sehen Fahrzeuge, bei denen ein LiDAR-System integriert ist noch gewöhnungsbedürftig aus. Das stellt zwar kein Problem aus technischer Sicht dar, jedoch für das Design des Fahrzeugs. Aber auch diese Herausforderung kann mit der zukünftigen Weiterentwicklung von LiDAR gemeistert werden. [10] [13]

Zudem gibt es noch gesetzliche Einschränkungen, nämlich durch die Laserschutzklasse 1. Diese hat den Hintergrund, das menschliche Auge und dessen Netzhaut vor Schäden oder gar Zerstörung durch den Laser des LiDAR zu schützen. Da das verwendete Frequenzspektrum nah an dem für das menschliche Auge sichtbaren Bereich liegt, wirkt dessen Linse wie ein fokussierendes Brennglas. Der Laserstrahl ist allerdings nicht sichtbar. Dies hat zur Folge, dass die natürlichen Schutzmechanismen, wie das Blinzeln, nicht funktionieren. Aufgrund dessen wurden einige technische Randbedingungen abgesteckt. Unter anderem wurde festgelegt, dass die verwendete Wellenlänge zwischen 850 und 1000 Nanometern liegen muss. Zudem hat die

Ausgangsspitzenleistung minimal 10 und maximal 75 Watt zu betragen. Die Ausgangsdurchschnittsleistung muss zwischen 2 und 5 Milliwatt liegen. [13]

III Konzeption

A Die atmosphärische Dämpfung

In der Atmosphäre liegt immer, egal bei welchen Wetterbedingungen, eine gewisse Dämpfung vor. Es handelt sich hierbei um die sogenannte atmosphärische Dämpfung. Wird in einem Medium elektromagnetische Energie teilweise oder sogar komplett verschluckt, dann spricht man von Absorption. Ein anderer Begriff für Absorption ist Dämpfung. In der Atmosphäre ist diese bei Wellenlängen bis zum Millimeter-Bereich zu vernachlässigen. Ab diesem Bereich treten Resonanzeffekte der neutralen Sauerstoffmoleküle und der Moleküle des nichtkondensierten Wasserdampfes und eine merkliche Absorption auf. Nichtkondensierter Wasserdampf wird in relativer Luftfeuchte angegeben und ist abhängig von der Temperatur. Es gilt nämlich, warme Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen als kalte Luft. Daraus ergibt sich, dass die Dämpfung der elektromagnetischen Welle durch die Atmosphäre von der Frequenz, der Wellenlänge, der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit abhängt. Atmosphärische Dämpfungsverluste bestehen aus einer Grunddämpfung durch die Atmosphäre und einer stark wetterabhängigen Zusatzdämpfung durch Nebel und/oder Regen (siehe Abbildung 3).

Die Strahlung wird beim Durchdringen von Luft-

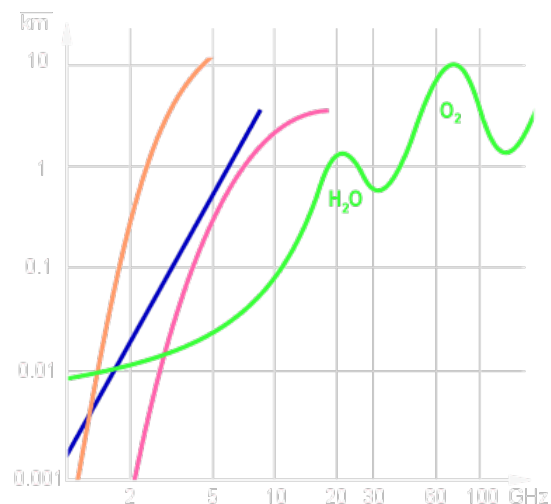


Abbildung 3 atmosphärische Dämpfung vgl. [14]

und Wasserdampfschichten abgeschwächt. Dies erfolgt hauptsächlich durch Wasserdampf- und Sauerstoffmoleküle. Ein Teil, der durch die Kohibition verlorenen Energie, wird in Wärme umgewandelt. Ein anderer Teil wird zerstreut. Im Diagramm in Abbildung 3 ist zu sehen, wie die Dämpfung mit steigender Feuchtigkeit zunimmt. Außerdem ist zu erkennen, dass mit

höherer Sendefrequenz die Abmilderung ebenfalls größer wird. [14]

Bei erhöhter atmosphärischer Dämpfung, beispielsweise durch Regen oder Nebel, kann es zu einem Sättigungsverhalten im Sensor kommen. Das bedeutet, das LiDAR kann keine zurückgestrahlten Impulse mehr erfassen. Heutige Sensoren haben jedoch eine dynamische Anpassung der Empfindlichkeit. Zusammen mit der Mehrzielfähigkeit solcher Systeme können weiche atmosphärische Störungen vermessen werden. Mit der Form des empfangenen Signals lassen sich Aussagen über den Absorptionsgrad der atmosphärische Dämpfung treffen. Die Reichweitenperformance wird maßgeblich von der Intensität des ausgesendeten Lichtpulses und der Empfindlichkeit des Empfängers beeinflusst. [13]

B Wechselwirkung zwischen elektromagnetischen Wellen und Wassertropfen

Die Streuung und Absorption elektromagnetischer Wellen an Teilchen gehört zu den gut erforschten Gebieten der Physik. Streuung ist der Prozess, bei dem die Richtung der einfallenden Welle durch das Teilchen verändert wird. Sie basiert auf drei Annahmen. Erstens: Der Beitrag jedes Tropfens ist additiv und unabhängig von anderen Tropfen. Zweitens: die Tropfen werden als kugelförmige Wassertropfen angenommen, welche die Energie der einfallenden Welle streuen und absorbieren. Zuletzt noch: die Intensität der Welle nimmt exponentiell ab, während sie sich durch das Volumen des Regens oder Nebels fortbewegt. Dies liegt an der Absorption und Streuung die in diesem Bereich stattfindet. In der nachfolgenden Abbildung 4 ist dies zu sehen. Man sieht ebenfalls das die Wassertropfchen die sich auf der Länge L verteilen nicht alle den gleichen Durchmesser besitzen.

Die Streuung hängt vom Verhältnis zwischen der

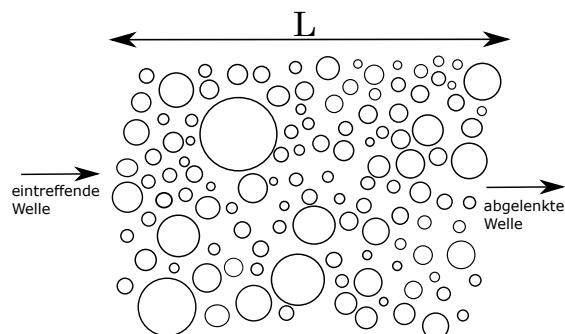


Abbildung 4 Ablenkung einer elektromagnetischen Welle angelehnt an [6] Abbildung 1

Wellenlänge λ und dem Radius des Teilchens r ab, wie in Formel 2 dargestellt. Die Art der Streuung hängt vom Größenparameter x ab.

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2)$$

Bei der Absorption entsteht Wärmeenergie. Zusätzlich wird hier und bei der Streuung noch der ausgesendeten Welle Energie entzogen. Es liegen Verluste vor, diese bezeichnet man auch als Auslöschung. Abhängig vom Verhältnis des Teilchens zur Wellenlänge verwendet man unterschiedliche Ansätze für die geometrische Optik der Teilchen beziehungsweise Tröpfchen. Umgebungswasser sorgt für eine Reduktion der Reflektivität aufgrund von Oberflächenfeuchtigkeit. Der Einfluss ist allerdings kleiner als der der atmosphärischen Dämpfung. Bei ungünstigen Wetterbedingungen wie Regen oder Nebel erhöht sich die Dämpfung durch die zusätzlichen Wassertropfen in der Luft. Diese absorbieren und streuen, wie bereits beschrieben, die Strahlung, welche LiDAR aussendet. Dies hat einen negativen Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit. [5] [6] [15]

C Beeinflussung durch Regen

Für Regen werden zunächst Wolken benötigt. Diese entstehen bei der Kondensation von Wasserdampf in der Luft und durch dessen Abkühlung beim Aufsteigen. Hierbei kondensiert anschließend der gasförmige Wasserdampf zu kleinen Wassertropfchen. Diesen verflüssigten Dampf nehmen wir nun als Wolken wahr. Werden die Wassertropfchen schließlich größer als 10 Mikrometer Durchmesser, können sie nicht mehr in der Luft schweben. Die Schwerkraft ist nun größer als der Auftrieb, folglich fallen die Tropfen als Regen zu Boden. Ihre Fallgeschwindigkeit ist abhängig von der Tropfengröße. Es gilt: je größer die Tropfen, desto höher ist ihre Fallgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeiten liegen zwischen 0.1 und mehr als 9 Metern pro Sekunde. Die Durchmesser reichen von 0.1 bis hin zu 9 Millimetern. Je nachdem lässt sich der Regen in verschiedene Arten einteilen, wie in Tabelle 1 zu sehen ist.

Durchschnittlich enthält ein Volumen von 1 m^3 Luft

Tabelle 1 Einteilung der Regenarten nach Tropfendurchmesser vgl. [8]

Tropfendurchmesser	Niederschlagsart
0.1 mm - 0.5 mm	Sprühregen (Nieselregen)
0.5 mm - 5.0 mm	Regen

ungefähr 10^3 Tropfen. Hier gilt jedoch, je kleiner die Durchmesser der Tropfen sind, desto mehr sind im Volumen enthalten. [5] [8]

Schnee stellt eine Sonderform des Regens dar, die nur bei Temperaturen kleiner 0°C entsteht. Auf Grund dessen wird Schnee in dieser Arbeit außen vor gelassen. [8]

Beim LiDAR kann es durch Regentropfen zu einer

falschen Objekterkennung kommen. Das bedeutet obwohl sich kein Objekt im Nahfeld befindet, wird trotzdem ein Körper erkannt. Vor allem wenn sich ein Regentropfen sehr nah am Sensor befindet kann so etwas passieren. Das geschieht, da der Laserstrahl dann ein Teilchen kreuzt und dieses sodann durch Streuung einen Lichtstrahl erzeugt. Dieser wird dann von der Empfangseinheit erkannt, diese fasst den gestreuten Strahl nämlich als Objekt auf. Grund hierfür sind Wassertropfen-Reflexionen. Außerdem nimmt die Sichtweite mit steigender Regenintensität ab, der Strahl wird zusätzlich noch verzerrt. Grund hierfür sind die Streuung und Absorption. Wenn LiDAR für die dreidimensionale Umfelderkennung, mittels einer Punktwolke, verwendet wird, sinkt die Objektpunktdichte und Intensitätsvarianz durch den Niederschlag. Welcher die Rückstreuung des ausgesendeten Signals stört. Was zu einem Verlust von Informationen innerhalb der Dimension des Objekts führt. Man spricht hier alsdann auch von Rauschen. Das Vorhandensein von solchem Rauschen oder der Verlust des Signals verändert folglich die Informationen, die das Fahrzeugumfeld repräsentieren. [5] [12]

D Beeinflussung durch Nebel

Unter Nebel versteht man einen Teil der Atmosphäre, bei dem in der Luft schwebenden Tröpfchen enthalten sind und die Sichtweite auf weniger als 1 Kilometer reduziert ist. Meist tritt er vor allem in kühlen Jahreszeiten, wie dem Herbst, auf. Er ist für uns sichtbar, da durch die Mie-Theorie das Licht hier gleichmäßig gestreut wird. Diese beruht darauf, dass der Radius der Nebelpartikel von der Größenordnung der Lichtwelle ist. Nebel entsteht durch Kondensation, ähnlich wie Wolken. Bei der Abkühlung von warmer und feuchter Luft kann der entstehende Wasserdampf nicht mehr gespeichert werden, welcher dann zu Nebeltröpfchen kondensiert. Kleine Partikel wie beispielsweise Pollen, Salze oder feiner Staub sind bei der Nebelbildung von entscheidender Bedeutung. Da der Wasserdampf an deren Oberfläche kondensiert. Der Durchmesser der Nebeltröpfchen liegt typischerweise zwischen 5 und 20 Mikrometern, er hängt von der Art des Dunstes ab. Die Größe der Tröpfchen entscheidet auch, ob eine nässende Nebelbank vorliegt. Ein Volumen von 1 m^3 Luft enthält mehr als 10^6 Tropfen. Das ist um mehrere Größenordnungen höher als bei Regen. Begründen kann man das, mit der kleineren Tröpfchengröße von Nebeln gegenüber Regen. Je nach Sichtweite, lässt sich die Dichtigkeit unterschiedlich einteilen (siehe Tabelle 2).

Einige der wichtigsten Nebelarten sind der Boden-, Hoch-, Strahlungs- und Advektionsnebel. Dunst stellt eine nicht zu unterschätzende Behinderung des Fahrers im Straßenverkehr dar. Ursprünglich vermuteten Forscher, dass Leichtsinns und Fahrlässigkeit die Ursachen für Verkehrsunfälle bei einer auftretenden Nebel-

Tabelle 2 Einteilung von Nebel nach Sichtweite vgl. [2]

Sichtweite	Nebelart
> 500 Meter	leichter Nebel (Dunst)
< 200 Meter	dichter Nebel
< 100 Meter	sehr dichter Nebel

bank waren. Dr. Ivan Braun jedoch stellte fest, dass Fahrer durch Nebel die volle Zurechnungsfähigkeit, ohne ihre eigene Schuld, verlieren. Daraus resultiert dann, dass Fahrzeugführer ihre Entfernungen und tatsächliche Geschwindigkeit falsch einschätzen. [2] [5] Beim Betrieb von LiDAR-Sensoren in einem nebligen Umfeld kann es zu einer fehlerhaften Objekterkennung kommen. Es kann nämlich passieren, dass einer oder mehrere Körper erkannt werden, obwohl sich kein Gegenstand im Sichtfeld des Sensors befindet. Außerdem ist es möglich, dass der erkannte Körper den Gegenstand dahinter verdeckt. Bei Punktwolken sinkt, durch Nebel im Blickfeld, die Objektpunktdichte und die Intensitätsvarianz. Außerdem gilt, dass mit sinkender Sichtweite durch den Dunst die Reichweite des LiDAR abnimmt. Allgemein bricht die Leistung moderner LiDAR-Sensoren bei Nebel ein. Ein Grund hierfür sind die Einschränkungen durch die *Laserschutzklasse 1*. LiDAR ist besonders empfindlich gegenüber Nebel, verglichen mit Regen. Was vor allem an der Mehrzahl an Partikeln und einer daraus resultierenden höheren Rückstreuung liegt. [5] [6]

IV Zusammenfassung & Ausblick

Optische Sensoren, wie das LiDAR, arbeiten unter den eben beschriebenen Wetterbedingungen nicht korrekt. Grund hierfür ist das *Time Of Flight*-Arbeitsprinzip, da hier jegliche Störung im Ausbreitungsmedium die Sensorerfassung behindern. Eine Dämpfung im Umfeld stellt auch eine Herausforderung für die Algorithmen, die man zur Umfelderkennung benötigt, dar. Sie müssen zukünftig in Bezug auf Störungen und Signalveränderungen weiterentwickelt werden, unter Berücksichtigung von verschiedenen Wetterszenarien. Für maschinelle Lernverfahren zur Objekterkennung muss der Einfluss des Wetters auf die Genauigkeit ebenfalls berücksichtigt werden. Durch eine andere Wellenlänge lässt sich dem Problem teilweise entgegen wirken. Nutzt man beispielsweise eine Wellenlänge von 1550 Nanometern, lässt sich das am besten mit der *Laserschutzklasse 1* vereinen. Die Leistung, die dann verwendet werden darf ist 20 mal höher als bei anderen Wellenlängen. Da LiDAR-Sensoren in Zukunft vor allem für die Objekt- beziehungsweise die Umfelderkennung verwendet werden, sollten dessen Sensordaten bei schlechten Wetterverhältnissen weniger schwer gewichtet werden, um die Funktionstüchtigkeit der Fah-

rerassistenzsysteme nicht zu schwächen und daraus eventuell resultierende Autounfälle zu vermeiden. Vor allem bei schlechten Wetterbedingungen ist das von großer Bedeutung, da hier nämlich auch die Sicht des Fahrers beeinträchtigt wird und die ordnungsgemäße Funktion von Fahrerassistenzsystem von immenser Wichtigkeit ist. Einige der momentan verkauften Produkte verfügen bereits über eine automatische Nebelkorrektur. Daher können Regentropfen durch den Einsatz pixelorientierter Auswertung herausgefiltert werden. [5] [6][12] [15]

Obwohl LiDAR ein sehr vielversprechendes Sensorsystem ist, wird es nicht die einzige Lösung für das autonome und automatisierte Fahren sein, denn kein Sensorsystem kann nur für sich allein all die Messungen beziehungsweise Abtastungen machen, die dafür nötig sind. Vor allem nicht bei schlechten Wetterbedingungen, wie beispielsweise bei Regen oder Nebel. Es wird eher darauf hinaus laufen, dass mehrere Systeme kombiniert werden müssen. Dies kann zum Beispiel durch die Überlagerung der Messdaten verschiedener Sensorarten, wie Kamera, Radar oder Ultraschallsensoren, erfolgen. Dadurch werden die Vorteile der einzelnen Systeme miteinander gekoppelt. LiDAR erkennt nämlich beispielsweise, im Gegensatz zu Kameras, nicht die Farbe des Objekts. Radarsysteme besitzen bei schlechten Wetterbedingungen, verglichen mit LiDAR-Systemen, eine bessere Performance. Im Nahfeld besitzen Ultraschallsensoren eine höhere Auflösung als LiDAR-Sensoren, welche zum Beispiel beim automatischen Parkassistent benötigt wird. Bei diesem Ansatz müssen zukünftige Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen dann eine Software, in der künstliche Intelligenz enthalten ist, besitzen. Dort werden dann alle Sensordaten der unterschiedlichen Systeme vereint und ausgewertet. Allerdings wird für diese Entwicklungen noch Zeit benötigt. [7]

Ein anderer Ansatz zur Optimierung des LiDAR ist die Entwicklung sogenannter Multisensoren. Das bedeutet, dass man mehrere Sensoren in einem Gerät vereint. Solche Systeme liegen im Trend, da sie als variabler und lernfähiger gelten. Hier ist beispielsweise die *Photonic Mixer Device*-Kamera (PMD-Kamera) zu nennen. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus einer Kamera und einem Laserscanner, wie zum Beispiel LiDAR. Sie stellen einen bildgebenden Sensor dar, der über das normale 2D-Bild hinaus noch Abstands- und Tiefeninformationen einer Szenerie, dann als 3D-Bild, direkt aufnehmen kann. Verwendungsgebiet im Automotive-Bereich ist hauptsächlich zur Kartengenerierung der Fahrzeugumgebung, sowie der Hindernis- und Fahrwegserkennung. Hauptbestandteile sind die externe Sendeeinheit (LED-Array) und der interne PMD-Chip, der die PMD-Pixel enthält. Ihr Aufbau stellt zwei in Sperrrichtung betriebene Dioden dar. Das Funktionsprinzip basiert, ähnlich der Empfangseinheit des LiDAR, auf der *Time Of Flight*-Methode (siehe Kapitel 3A, Formel 1), al-

so der Lichtlaufzeit. Da hier ebenfalls extrem kleine Zeiten entstehen, sind sehr aufwendige und komplexe Maßnahmen für deren Ermittlung notwendig. 3D-Tiefenbilder von PDM-Kameras enthalten einen hohen Rauschanteil. Daher ist eine Glättung, beziehungsweise Rauschunterdrückung, erforderlich. Außerdem muss bei der Integration in das Fahrzeug einiges beachtet werden. Die eben genannten und noch einige weitere Gründe (vor allem der noch sehr hohe Preis) führen dazu, dass PMD-Kameras momentan noch nicht serienreif sind. [11]

Sowohl der Ansatz der Datenfusion, als auch der Ansatz der Multisensoren sind sehr interessant für die Zukunft, da sie günstiger werden, kompakter sind, energieeffizient arbeiten und eine hohe Genauigkeit bei der Detektion erzielen. Die entstehenden Redundanzen in der Umfelderkennung sind hier eindeutig erwünscht, da sie die Funktionssicherheit der Fahrerassistenzsysteme erhöhen. Fällt beispielsweise ein Sensor aus, so sind noch die Daten der anderen Sensoren vorhanden, mit denen Unfälle und brenzlige Situationen vermieden werden können. Experten erwarten in der Zukunft einen speziell auf die jeweilige Aufgabe ausgelegten Sensor-Mix. Hier wird es sich meist um eine Mischung aus Kamera-, Radar- oder LiDAR-Sensoren handeln. [3]

Literatur

- [1] Automobil-Club Deutschland e.V., Hrsg. *Autonomes Fahren: Digital entspannt in die Zukunft*. 2021. URL: <https://www.adac.de/rundums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/technik-vernetzung/aktuelle-technik/>.
- [2] Peter Brüesch. *Der Nebel: Report*. 2016. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/156082/1/eth-50191-01.pdf>.
- [3] Günter Eymann. *Automatisiertes Fahren: Sensortechniken im Check*. Hrsg. von Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2019. URL: <https://www.vdi.de/news/detail/automatisiertes-fahren-sensortechniken-im-check>.
- [4] Frost & Sullivan, Hrsg. *LiDAR: Driving the Future of Autonomous Navigation: Exclusive Whitepaper*. 2016. URL: <https://pdf4pro.com/view/lidar-driving-the-future-of-autonomous-navigation-2f66.html>.
- [5] Sinan Hasirlioglu. „A Novel Method for Simulation-based Testing and Validation of Automotive Surround Sensors under Adverse Weather Conditions / submitted by Sinan Hasirlioglu“. Dissertation. Linz: Johannes Kepler Universität Linz, Februar 2020. URL: <https://>

- // epub . jku . at / obvulihs / content / titleinfo/4837383.
- [6] Sinan Hasirlioglu und Andreas Riener. „Introduction to rain and fog attenuation on automotive surround sensors“. In: *IEEE ITSC 2017*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017. ISBN: 9781538615263. DOI: 10.1109/itsc.2017.8317823.
- [7] Jeff Hecht. „Lidar for Self-Driving Cars“. In: *Optics and Photonics News* 29.1 (2018), S. 26. ISSN: 1047-6938. DOI: 10.1364/opn.29.1.000026.
- [8] Doris Klein und Gunter Menz. *Wohin der Regen fällt: Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland*. 2003. URL: http://archiv.nationalatlas.de/wp-content/art_pdf/band3_42-43_archiv.pdf.
- [9] Martin Kords. *Anzahl der Getöteten im Straßenverkehr in Deutschland von 1950 bis 2020*. Hrsg. von Martin Kords. 2021. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/185/umfrage/todesfaelle-im-strassenverkehr/#:~:text=Verkehrstote%20in%20Deutschland%20bis%202020&text=Im%20Jahr%202020%20waren%20in,Menschen%20im%20Stra%C3%9Fenverkehr%20t%C3%B6dlich%20verungl%C3%BCckt..>
- [10] Patrick Richter. *Entwicklung eines kamerabasierten Evaluierungsverfahren für Fahrerassistenzsysteme mit autonomen Notbremseingriff: Masterarbeit*. o.J. [2016]. URL: https://www.htw-mechlab.de/wp-content/uploads/2016/04/masterarbeit_p_richter.pdf.
- [11] Alexander Prusak. „Einsatz der PMD-Kamera in der mobilen Robotik für die Hinderniserkennung und -vermeidung sowie für die Selbstlokalisierung“. Dissertation. Siegen: Universität Siegen, 21.11.2012. URL: <https://dspace.ub.uni-siegen.de/handle/ubsi/733>.
- [12] Daniel Vriesman u. a. „An Experimental Analysis of Rain Interference on Detection and Ranging Sensors“. In: *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2020. ISBN: 9781728141497. DOI: 10.1109/itsc45102.2020.9294505.
- [13] Hermann Winner u. a. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015. ISBN: 978-3-658-05734-3.
- [14] Christian Wolff. *Grundlagen der Radartechnik: Absorption*. Hrsg. von radartutorial.eu. 2021. URL: <https://www.radartutorial.eu/07.waves/wa13.de.html#:~:text=Atmosph%C3%A4rische%20%C3%A4mpfungsverluste%20bestehen%20aus%20einer,von%20Luft%20und%20Wasserdampfschichten%20abgeschw%C3%A4cht..>
- [15] Shizhe Zang u. a. „The Impact of Adverse Weather Conditions on Autonomous Vehicles: How Rain, Snow, Fog, and Hail Affect the Performance of a Self-Driving Car“. In: *IEEE Vehicular Technology Magazine* 14.2 (2019), S. 103–111. ISSN: 1556-6072. DOI: 10.1109/MVT.2019.2892497. URL: https://www.researchgate.net/profile/ming_ding15/publication/331723697_the_impact_of_adverse_weather_conditions_on_autonomous_vehicles_examining_how_rain_snow_fog_and_hail_affect_the_performance_of_a_self-driving_car.