

TECHNISCHE MITTEILUNG

Eine Erläuterung der LiDAR-Komponenten und deren Funktionen in einem LiDAR-Sensor für Fahrerassistenzsysteme und autonome Fahrzeuge

Ein Überblick

Die vorliegende technische Mitteilung soll die verschiedenen Komponenten eines LiDAR-Sensors, die Funktionsweise und die Funktion der Komponenten in einem LiDAR-Sensor erläutern. Das Dokument beginnt mit einer Beschreibung der in einem LiDAR ablaufenden Prozesse und wie Abstand und Objektgeschwindigkeit mithilfe von Zeit und Abstand bzw. der Dopplerverschiebungsformel berechnet werden. Anschließend werden die verschiedenen Teilsysteme eines LiDAR mit Schwerpunkt auf LiDAR-Systemen für autonome Fahrzeuge erläutert. Der Schwerpunkt dieser technischen Mitteilung bezieht sich auf Laufzeit-LiDAR (ToF); ggf. wird auf Continuous-Wave-LiDAR-Systeme verwiesen.

Wie funktioniert ein LiDAR?

Ein Laufzeit-LiDAR gibt Impulse einer Lichtquelle aus und berechnet die Zeit, bis die reflektierten Impulse wieder eintreffen. Ein Continuous-Wave-LiDAR gibt kontinuierlich Photonen aus, deren Lichtfrequenz oder -phase nach einem bekannten Muster variieren. Anhand der Differenz zwischen dem ausgegebenen und zurückreflektierten Licht wird dann die Distanz berechnet. Die Geschwindigkeit des Objekts wird durch Messung der Dopplerverschiebung des eingegangenen Signals berechnet.

- **Berechnung des Objektabstands (bei einem Laufzeit-LiDAR):**

$$R = c * (\Delta t / 2)$$

- R = Objektabstand (m)

Hinweis: Die maximale Distanz, in der ein LiDAR ein Objekt erfassen kann, ist die LiDAR-Reichweite.

- c = Lichtgeschwindigkeit (m/s)

- Δt = Laufzeit (s)

Hinweis: Die Laufzeit ist die Zeit, die verstreicht, bis der Laserimpuls zum Sensor zurückkehrt und die Zeit, die der Impuls braucht, um das Objekt zu erreichen.

- **Gleichung der Dopplerverschiebung:**

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0}$$

- v = Geschwindigkeit des Objekts (m/s)

- c = Lichtgeschwindigkeit (m/s)

- $\Delta \lambda$ = Änderung der Wellenlänge (m)

- λ_0 = Referenz-Wellenlänge (m)

Das Laufzeit-LiDAR-System besteht aus einem Sender, einer Empfänger, einer Optik und einer Strahlstereinheit sowie einem Prozessor. Mithilfe dieser Teilsysteme ist das LiDAR-System in der Lage, eine Punktwolke seiner Umgebung zu erzeugen, welche dann vom Wahrnehmungssystem in einem autonomen Fahrzeug zur Erfassung, Klassifizierung und Nachverfolgung von Objekten verwendet wird. Die Funktionsweise des LiDAR-Systems wird nachfolgend vereinfacht beschrieben, um sie jedem Leser verständlich zu machen:

1. Der Lasertreiber feuert den Laserstrahl ab.
2. Der Timer startet.
3. Der Strahl passiert das optische System des Senders.
4. Der Strahl wird vom Objekt zurückgeworfen.
5. Der zurückgeworfene Strahl passiert das optische System des Empfängers.
6. Der zurückgeworfene Strahl fällt auf Photodetektoren und wird in ein elektrisches Signal umgewandelt.
7. Der Timer wird angehalten.
8. Analog-Digital-Umsetzer (ADC) wandeln das analoge Stromsignal vom Photodetektor in ein digitales Spannungssignal um.
9. Die digitalisierte Wellenform wird zu einer Punktwolke verarbeitet.

LiDAR-Übertragungsteilsysteme im Überblick

Laufzeit-LiDAR für Fahrerassistenzsysteme (FAS¹) und autonome Fahrzeuge arbeiten in der Regel mit Lasern, die kurze Lichtimpulse erzeugen, meist mit einer Wellenlänge von 905 nm und 1550 nm. Aufgrund der benötigten großen Reichweite bei FAS und autonomen Fahrzeugen muss die Laserleistung maximiert werden. Allerdings muss die Laserleistung zum Schutz der Augen auf die zulässigen Expositionsgrenzwerte der Lasersicherheitsnorm

¹ Englisch Advanced Driver Assistance Systems; ADAS.

EN 60825-1 beschränkt bleiben. Ein Nebeneffekt hochenergetischer Impulse (im Bereich von Nanosekunden) ist das Entstehen von Wärme. Die im Laser entstehende Wärme birgt Komplikationen für LiDAR-Systeme, wie:

- Geringere Leistung
- Änderung der ausgegebenen Wellenlänge
- Elektromagnetische Störungen, die Rauschen verursachen
- Ungünstigeres Signal-Rausch-Verhältnis
- Größere Komplexität bei der Signalverarbeitung

Laser lassen sich nach ihrem Betriebsmodus (gepulste Laser und Continuous-Wave-Laser) und dem für die Erzeugung des Laserstrahl verwendeten Mittel beschreiben. Die wichtigsten Arten von Laser sind:

- **Gaslaser:** Elektrischer Strom wird durch ein gasförmiges Medium gesendet, um den Laserstrahl zu erzeugen. Für die Laseraktion ist eine Besetzungsinversion (es befinden sich mehr Atome im angeregten als im abgeregten Zustand) nötig.
- **Festkörperlaser:** Feste Materialien wie Keramik, Kristalle oder Glas werden mit Metallen der seltenen Erden (Nd, Cr, Er) dotiert, um einen optisch verstärkten Laserstrahl zu erzeugen. Dieser Laser werden häufig in LiDAR-Systemen eingesetzt.
- **Faserlaser:** Hier werden Glasfasern aus Quarzglas mit einem Metallen der seltenen Erden als Verstärkungsmedium verwendet.
- **Flüssiglas (oder Farbstofflaser):** Bei diesen Lasern wird ein organischer Farbstoff in flüssiger Form als Verstärkungsmedium verwendet. Diese Laser werden auch als „abstimmbare Laser“ bezeichnet, da sich ihre Wellenlänge während des Betriebs verändern lässt.
- **Halbleiterlaser:** Als Material für den p-n-Übergang wird eine Legierung aus Aluminium und Galliumarsenid verwendet, die es dem Laser ermöglicht, Resonanz und die für die Laseraktion erforderliche Verstärkung zu erreichen. Halbleiterlaser lassen sich, je nach Emissionsrichtung des Laserstrahls, weiter in kantenemittierende Laser (Edge-Emitting Laser; EEL) und Oberflächenemitter (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser; VCSEL) unterteilen.

Die zweite kritische Komponente innerhalb des Übertragungsteilsystems ist die Laserdioden-Treiberplatine, an der sich der Laser befindet. Die Treiberplatine ist für das Aufladen der Kondensatoren und das Abfeuern der akkumulierten Ladung an den Laser verantwortlich und erzeugt so den Impuls – alles zeitlich abgestimmt mit einer zentralen Synchronisationseinheit. Die LeddarEngine™ von LeddarTech ist eine System-on-Chip-Komponente, die das Abfeuern synchronisiert und die Signalerfassung und -vorverarbeitung durchführt. Die Laserdioden-Treiberplatine steuert der Diode zugeführten Strom, welche oft als Energiequelle dient und die Impulsdauer steuert.

LeddarTech ist Partnerschaften mit branchenführenden Komponentenanbietern eingegangen, um Know-how in der Emittertechnologie und bevorzugten Zugang zu Komponenten für LiDARs zu bieten. Dies spiegelt sich in der LiDAR XLRator™-Plattform sowie im Leddar™ Ecosystem wieder. Der LiDAR XLRator ist eine LiDAR-Entwicklungsplattform auf Basis der LeddarEngine (Zeitsynchronisation, Signalerfassung und -verarbeitung) für LiDAR-Entwickler, Tier-1-Hersteller und Systemintegratoren. Der folgende Abschnitt beschreibt das zweite Teilsystem eines LiDAR: das Empfängerteilsystem.

Das LiDAR-Empfängerteilsystem im Überblick

Die Empfängerteilsysteme bestehen in erster Linie aus dem Empfänger und der zugehörigen Optik. Empfänger wandeln Lichtenergie (Photonen) in elektrischen Strom um. Dieser Strom wird vom Ausleseteilsystem für die Signalverarbeitung und Erzeugung der Punktwolke verwendet.

Bei den in LiDAR für Fahrerassistenzsysteme (FAS) und autonome Fahrzeuge verwendeten Empfängertechnologien handelt es sich um Lawinenphotodioden (Avalanche Photodiodes; APDs), Einzelphotonen-Lawinendioden (Single-Photon Avalanche Diodes; SPADs) und Silizium-Photomultiplier (Silicon Photomultipliers; SiPMs).

Eine SPAD erfasst einzelne Photonen, ein SiPM ist parallel zu SPADs geschaltet und erfasst die Gesamtzahl der von allen SPADs erfassten Photonen. SPADs werden aufgrund ihrer höheren Sensitivität am häufigsten zur Photonendetektion eingesetzt. Je höher die Sensitivität des Photonendetektors, desto größer das Signal-Rausch-Verhältnis und die LiDAR-Reichweite. Die Sensitivität eines Empfängers bei der Photonendetektion in Kombination mit präziser Timing-Elektronik gibt die Abstandsgenauigkeit zu einem Objekt vor.

Lawinenphotodioden (APDs) können in linearem oder im Geiger-Modus betrieben werden. Im linearen Modus ist die APD ein vierschichtiges Gerät, das in Sperrvorspannung, unter ihrer Durchschlagspannung, funktioniert. Ihre Außenschichten sind stark dotiert und ihr Widerstand geringer. Wenn ein Photon auf dem Gerät einfällt, entsteht ein Elektron und ein Lochpaar in der mittleren intrinsischen Schicht der APD. Die in der intrinsischen Schicht der APD erzeugten Elektronen werden dann durch das starke elektrische Feld stark beschleunigt, was dazu führt, dass diese freien Elektronen mit den Atomen in der p-Schicht kollidieren, wodurch weitere Elektronen- und Lochpaare entstehen. Dieser Vorgang geht immer weiter und führt zu einer Multiplikation der entstehenden Elektronen (und Löcher). Dies wird als Stoßionisation bezeichnet – hier kollidiert ein Elektron mit einem Atom, so dass weitere Elektronen entstehen. Die Stoßionisation ist ein Beispiel für den intrinsischen Verstärkungsmechanismus des Empfängers.

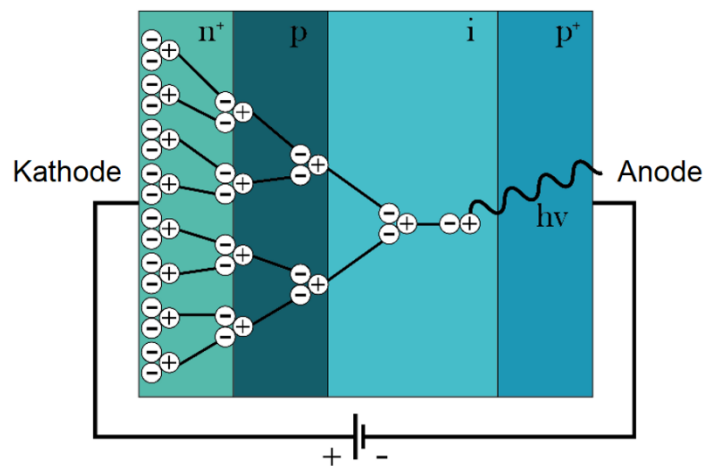


Abbildung 1 – Stoßionisation

Einzelphotonen-Lawinendioden (SPADs) sind APDs im Geiger-Modus. Sie funktionieren oberhalb der Durchschlagspannung und sind empfindlich für einzelne Photonen, die beim Auftreffen auf das Gerät eine sich selbsterhaltende Lawine auslösen und den Strom ansteigen lassen. Die selbsterhaltende Lawine wird durch Absenken des elektrischen Feldes an der Sperrschicht unter die Durchbruchspannung gelöscht. SPADs pausieren während des Betriebs, wenn kein Photoneinfall erfasst werden kann. Dies geschieht, wenn das elektrische Feld erneut auf die Diode wirken muss, um sie in ihren ursprünglichen Zustand zurückzusetzen.

LeddarTech ist Partnerschaften mit branchenführenden Komponentenanbietern eingegangen, um Know-how in der Sendertechnik und bevorzugten Zugang zu Komponenten für LiDARs zu bieten. Dies spiegelt sich in der LiDAR XLRator™-Plattform sowie im Leddar™ Ecosystem wieder. Der LiDAR XLRator ist eine LiDAR-Entwicklungsplattform auf Basis der LeddarEngine (Zeitsynchronisation, Signalerfassung und -verarbeitung) für LiDAR-Entwickler, Tier-1-Hersteller und Systemintegratoren. Im folgenden Abschnitt wird das dritte LiDAR-Teilsystem, das Verarbeitungssystem, beschrieben; eine kritische Komponente dieses Teilsystems ist LeddarEngine.

Das LiDAR-Verarbeitungsteilsystem im Überblick

Vom Empfänger erfasste Daten werden zu 2D-Bildern, 3D-Punktwolke, Objektgeschwindigkeit oder sonstigen Informationen verarbeitet. Das Ausleseteilsystem in einem LiDAR für FAS und autonomes Fahren umfasst in der Regel eine CPU, ein System-on-a-Chip (SoC) und ein Field Programmable Gate Array (FPGA). Das FPGA ist je nach Anwendung nötig oder auch nicht und führt in der Regel zeitkritische Erfassungsvorgänge aus.

Zusammen übernehmen diese Komponenten folgende Aufgaben:

- Signalverarbeitung
- Rauschunterdrückung
- Erfassung von Wellenformen
- Digitale Abtastung
- Erstellen der Punktwolke
- Berechnung der Laufzeit
- Berechnung der Dopplerverschiebung



Abbildung 2 – LeddarEngine zur Zeitsynchronisation, Signalerfassung und Verarbeitung

Manche Probleme im Verarbeitungssystem haben mit einer Begrenzung der digitalen Abtastung (was die LiDAR-Auflösung beeinträchtigt), Signalnebensprechen, Sättigung und Raschen zu tun. Die CPU/SoC führt entsprechende Algorithmen aus, um diese Probleme zu beheben. Ein weiteres Problem bei Verarbeitungsteilsystemen ist die erforderliche Rechenleistung; für eine präzise Punktwolke der Umgebung müssen große Datenmengen verarbeitet werden. Die LeddarEngine von LeddarTech ist ein SoC mit Funktionalitäten zur Signalerfassung und -verarbeitung. Die LeddarEngine umfasst den LeddarCore™ SoC und die LeddarSP™ Signalverarbeitung und unterstützt mehrere LiDAR-Architekturen. Sie basiert auf eigens entwickelten Signalerfassungs- und Verarbeitungsalgorithmen, die folgende Herausforderungen beheben:

- Signal crosstalk
- Sättigung
- Rauschen
- Begrenzungen der Abtastrate

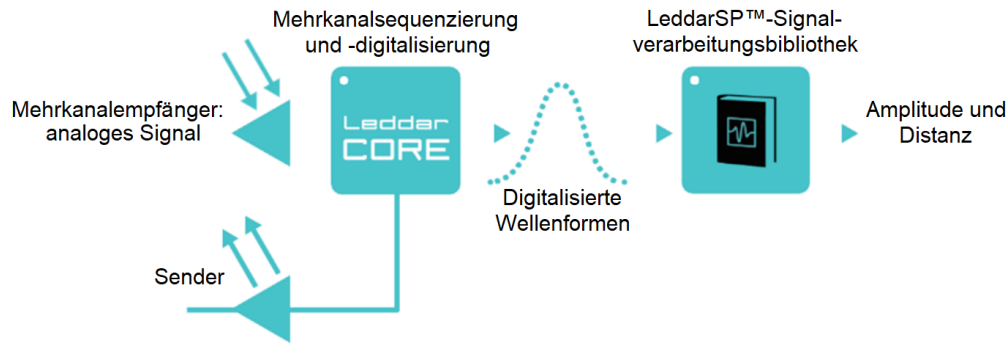


Abbildung 3 – Ablaufdiagramm zu Signalerfassung und -verarbeitung

Diese eigens entwickelten Algorithmen und Technologien der LeddarEngine bieten eine für den Einsatz in der Automobilindustrie geeignete Präzision. Diese liegt bei einer Reichweite von bis zu 300 m bei 5 cm bzw. 1 cm. Die Spezifikationen der LeddarEngine finden sie unter: [LeddarEngine-Video zu Spezifikationen und Leistung](#).

Strahlsteuerung und optische Einheiten im Überblick

Laufzeit-LiDAR, außer Blitz-LiDAR, senden im Sichtfeld des LiDAR in verschiedenen Winkeln Laserimpulse aus. Die Umlenkung eines Laserstrahls in einem bestimmten Winkel nennt man Strahlsteuerung. Traditionell wurde die Strahlsteuerung durch ein elektromechanisches System an der Sendereinheit erreicht, allerdings haben in letzter Zeit mikroelektromechanische Spiegel (Micro-Electromechanical System; MEMS) an Popularität gewonnen. Wenn Strom durch einen in einem magnetischen Feld befindlichen Leiter fließt, wirkt eine Kraft auf den Leiter. Die Spiegel eines MEMS nutzen dieses Phänomen, um die Spiegelwirkung elektronisch zu steuern und eine Strahlsteuerung zu erwirken.

LiDAR für FAS und autonome Fahrzeuge müssen jedoch Festkörper sein, d. h. sie dürfen keine beweglichen Teile aufweisen. Die bevorzugte Methode für die Strahlsteuerung sind Flüssigkristalle und Lichtpolarisation. Es gibt verschiedene Wege, mit Flüssigkristallen und polarisiertem Licht eine Änderung der Lichtrichtung zu erwirken, z. B. durch verdrehte nematische Kristalle; LeddarTech verwendet zwei Komponenten auf Flüssigkristallbasis, um zwei verschiedene Ziele zu erreichen. Zum einen wird eine Schicht dynamisch kontrollierbarer Flüssigkristallzellen eingesetzt, welche die Richtung der kreisförmigen Polarisation vorgeben. Die zweite Komponente ist eine Schicht passiver Flüssigkristalle, in der die Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle in einem Muster fixiert ist. Dies ist in Abbildung 4 weiter unten beispielhaft dargestellt.

Das Licht wird beim Passieren der ersten Schicht kreisförmig polarisiert und in einem Winkel oder – je nach Polarisationsrichtung – dem gegenüberliegenden Winkel gebeugt. Die Beugung erfolgt im zweiten Flüssigkristall – und zwar in polarisationsabhängigen Beugungsgittern. Um die Richtung der kreisförmigen Polarisation zu ändern, werden Flüssigkristallmoleküle an einem bestimmten Punkt in die gewünschte Richtung ausgerichtet, indem elektrische Spannung auf die Zelle gelegt wird.

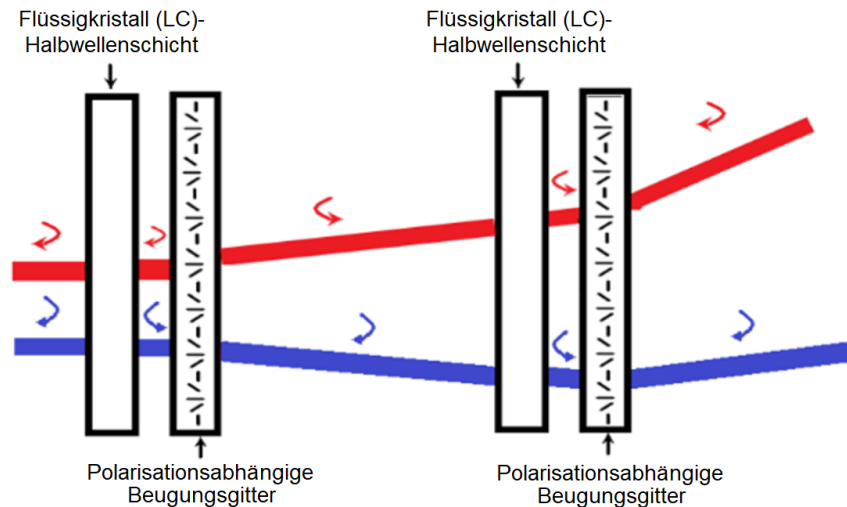


Abbildung 4 – Zwei Flüssigkristallschichten werden für die Strahlsteuerung verwendet

Durch Strahlsteuerung erhöht sich die LiDAR-Leistung, indem das Sichtfeld in kleinere Abschnitte unterteilt und der LiDAR-Sender und/oder -Empfänger in Richtung dieses Abschnitts umgelenkt wird. LeddarTech's Strahlsteuerungslösung, genannt LeddarSteer™, steuert aktiv die Temperatur in der Strahlsteuerungseinheit durch einen Wärmereglerkreis. Weitere Vorteile der digitalen Strahlsteuerung:

- Verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis und größere LiDAR-Reichweite
- Kompaktere, kostengünstigere und weniger komplexe LiDAR-Komponenten
- Das LiDAR-System kommt mit einem kleineren optischen Modul aus
- Festkörpertechnologie ohne bewegliche Teile für eine längere Betriebsdauer
- Vergrößertes Sichtfeld und Azimut; bis zu 120° pro Achse

Ökosystem-Partnerschaften: Ein signifikanter Mehrwert bei der LiDAR Entwicklung

Die Entwicklung von LiDAR-Sensorlösungen in Automobilqualität für FAS und autonomes Fahren ist ein komplexes, ressourcenintensives Unterfangen, das die Kombination einer Vielzahl von technischen Kompetenzen erfordert. Vor diesem Hintergrund hat LeddarTech das Leddar™ Ecosystem ins Leben gerufen, das eine ausgewählte Gruppe von strategischen Partnern von führenden Unternehmen, strategischen LiDAR-Komponenten-Lieferanten und anderen Kooperationspartnern zusammenbringt, um die Entwicklungsaktivitäten von Tier-1-, Tier-2- und LiDAR-Herstellern zu unterstützen und zu beschleunigen. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Teilnehmer.



Abbildung 5 – Partner im Leddar™ Ecosystem

Videos, Bilder und das technische Datenblatt zur digitalen Strahlsteuerung sowie weitere Informationen zur Rolle in der Entwicklung von autonomen Lösungen finden Sie auf leddartech.com/solutions/leddarsteer-digital-beam-steering/.

LeddarTech®

KANADA – USA – ÖSTERREICH – FRANKREICH – DEUTSCHLAND – ITALIEN – ISRAEL – HONGKONG – CHINA

Hauptgeschäftssitz

4535, boulevard Wilfrid-Hamel, Suite 240
 Québec (Québec) G1P 2J7, Kanada
leddartech.com

Tel. + 1-418-653-9000
 Gebührenfrei: 1-855-865-9900

© 2022 LeddarTech Inc. Alle Rechte vorbehalten. Die Leddar™-Technologie ist durch mindestens eines der folgenden US-Patent geschützt: 7855376B2, 7554652, 8319949B2, 8310655, 8242476, 8908159, 8767215B2 oder deren internationale Entsprechungen. Weitere Patente stehen aus. Die aktuellste Version dieser technischen Mitteilung finden Sie auf unserer Website. Leddar, LeddarTech, LeddarSteer, LeddarEngine, LeddarVision, LeddarSP, LeddarCore, LeddarEcho, VAYADrive, VayaVision, XLRator und die dazugehörigen Logos sind Marken oder eingetragene Marken von LeddarTech Inc. und dessen Tochterunternehmen.

Der Inhalt dieses Dokuments kann sich unangekündigt ändern.