

# LiDAR-Zielsimulator unter Berücksichtigung von Hintergrundlicht und gegenseitiger Störung

Sara Grollius, Jennifer Ruskowski, Manuel Ligges, Anton Grabmaier

sara.grollius@ims.fraunhofer.de

**Abstract:** Autonomes Fahren erfordert den Einsatz von Sensorsystemen wie zum Beispiel LiDAR (Light Detection and Ranging) für die 3D-Umgebungserfassung. LiDAR-Systeme können eine Objektdistanz messen, indem ein Laserpuls ausgesendet, am Objekt reflektiert und vom Sensor empfangen wird. Unser aktueller Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung eines *over-the-air* LiDAR-Zielsimulators als mögliches Testsystem. Im Gegensatz zu verbreiteten Testverfahren wie zum Beispiel Softwaresimulationen oder Testfahrten kann der LiDAR-Zielsimulator das gesamte LiDAR-System vollumfänglich und gleichzeitig zeit- und kosteneffizient in einer Laborumgebung testen. Dazu soll der LiDAR-Zielsimulator auf einen vom LiDAR-System emittierten Laserpuls antworten, indem er einen simulierten Lichtpuls zurücksendet, welcher die Reflexion eines virtuellen Objekts mit gewünschter Entfernung und Reflexionsgrad nachbildet. Wir präsentieren erste Ergebnisse zu einem solchen Testsystem und berücksichtigen dabei erstmalig kritische LiDAR-Szenarien wie bspw. Szenen mit starkem Hintergrundlicht durch die Sonne als auch störendes Licht anderer LiDAR-Systeme. Dafür wird ein erster, einkanaliger Laboraufbau vorgestellt, der beispielhafte Testszenarien für einen einzelnen LiDAR-Pixel erzeugen kann. In Zukunft könnten derartige Zielsimulatoren eine Testmöglichkeit für die verschiedenen LiDAR-Systeme autonomer Fahrzeuge darstellen, sodass deren Entwicklung beschleunigt und die Sicherheit autonomer Fahrzeuge erhöht wird.

## 1 Einleitung

In naher Zukunft kann die Anzahl an Fahrzeugen mit Fahrerassistenzsystemen (*Advanced Driver Assistance Systems*, ADAS) rasant ansteigen und das Level des autonomen Fahrens die Stufe 5 erreichen, was einem vollständig selbst fahrenden Auto entspricht. Autonomes Fahren basiert auf verschiedenen Sensorsystemen wie Kamera, Radar (Radio Detection and Ranging), LiDAR (Light Detection and Ranging) oder Ultraschall. Eine typische Produktentwicklung in der Automobilindustrie wird durch das V-Modell in Abbildung 1 beschrieben. Um die Fahrersicherheit zu gewährleisten, müssen die Sensoren standardisierten und zuverlässigen Tests unterzogen werden, welche in verschiedenen Stadien der Sensorentwicklung eingesetzt werden können. Für die moderne Technologie LiDAR gibt es derzeit keine allgemeingültigen Standards oder Teststrategien. Neben allgemeinen Normen der Automobilindustrie werden häufig kundenspezifische Testlösungen für LiDAR-Systeme entwickelt. Es gibt LiDAR-Simulationsprogramme, Optiktests, LiDAR-

Messungen von Targets mit definiertem Reflexionsgrad und Testfahrten mit dem autonomen Fahrzeug auf Testgeländen oder im Straßenverkehr [dSP, IPG21, DIO, Lab, Ald]. Jedoch ist kein Integrationstest verfügbar, der das gesamte LiDAR-System als *Device Under Test* (DUT) testen kann. Die Funktion des LiDAR-Systems wird zwar anhand der Testfahrten ebenfalls geprüft, aber die Testszenarien hängen von der jeweiligen Tageszeit und dem Wetter ab, sodass die Testfahrten abhängig von den vorherrschenden Wetterbedingungen geplant werden müssen. Außerdem ist die Abdeckung aller möglichen Szenarien nicht sichergestellt, da bestimmte Umweltbedingungen wie Schnee schwieriger getestet werden können und Unfallszenarien nur schwer umsetzbar sind. Hinzu kommt, dass die jeweiligen Szenarien nicht reproduzierbar sind, sondern bei verschiedenen Testfahrten unterschiedlich ausfallen können. Daher präsentieren wir als vielversprechenden Integrationstest einen LiDAR-Zielsimulator. [Gro22]

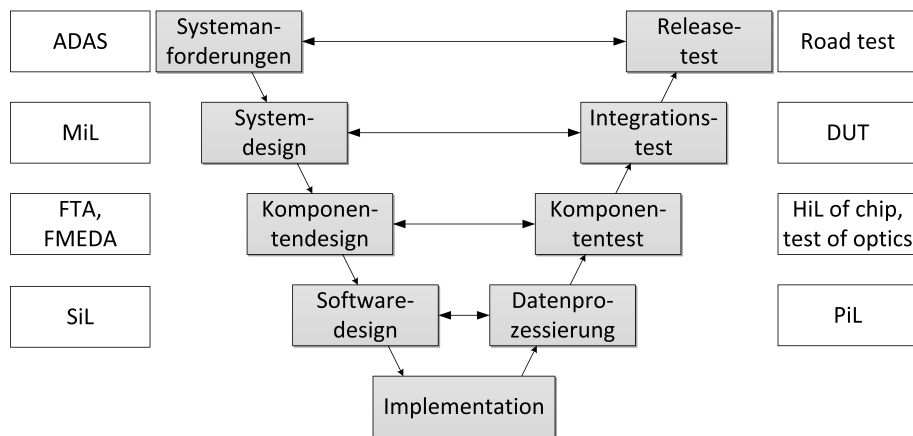


Abbildung 1: Integrationstest des V-Modells kann durch einen Zielsimulator realisiert werden [GLRG21]

## 2 Konzept LiDAR-Zielsimulator ATLAS

Ein LiDAR-Zielsimulator (*LiDAR Target Simulator*, LTS) stellt eine Kinoleinwand für ein LiDAR-System dar, was in Abbildung 2 illustriert ist. Mit diesem LTS-Schirm kann das System in einer Laborumgebung vollumfänglich getestet werden. Dabei kann das LiDAR-System sowohl einzeln vor den LTS-Schirm gestellt werden als auch integriert im Fahrzeug. Im Gegensatz zu realen Testfahrten hat ein LiDAR-Zielsimulator den Vorteil, dass alle erforderlichen Szenarien abgedeckt werden können und deren Reproduzierbarkeit insbesondere in Bezug auf Wetterbedingungen gewährleistet werden kann. Außerdem besteht ein geringer Materialbedarf mit Hinblick auf den Test von Unfallszenarien. Ein LiDAR-Zielsimulator kann vorgegebene Testprogramme vollautomatisch Tag und Nacht durchlaufen lassen, sodass der Zeitbedarf bis zur Abschließung aller Tests viel geringer ist als bei Testfahrten und auch nur wenig Personal benötigt wird. Daher ist unser aktueller Forschungsschwerpunkt die Entwicklung des *over-the-air* LiDAR-Zielsimulators ATLAS (*Automatically Testing of LiDAR Applicative Situations*). [Gro22]

Im Folgenden wird das Konzept des ATLAS *over-the-air* LiDAR-Zielsimulators näher erläutert. Die Hauptkomponente ist der LTS-Schirm, welcher mit einer hinreichend großen

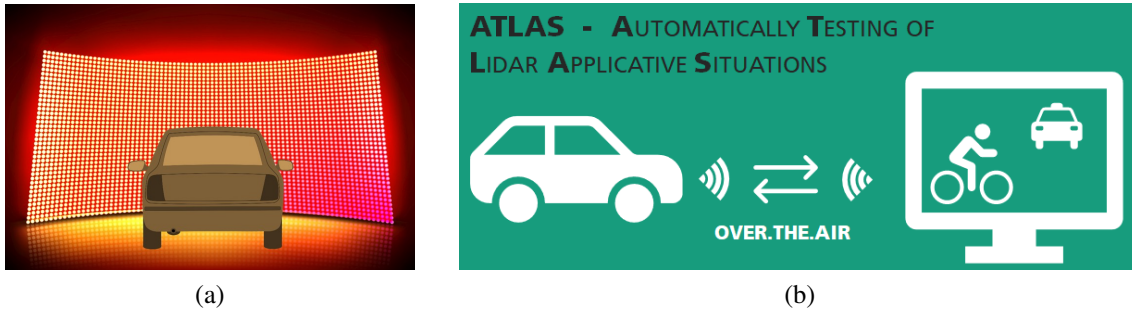


Abbildung 2: ATLAS *over-the-air* LiDAR-Zielsimulators fungiert als Kinoleinwand für das LiDAR-System [Gro22]

Distanz von 1-2 Metern vor das LiDAR-System gestellt werden muss, sodass er durch die Optik des LiDAR-Systems scharf abgebildet werden kann. Auf diesem LTS-Schirm befinden sich LTS-Lichtquellen, wobei eine Lichtquelle pro Pixel des LiDAR-Systems vorgesehen wird. Der LTS-Schirm kann entweder gekrümmt oder flach realisiert werden. Ein flacher Schirm hat den Vorteil, dass er wie in Abbildung 3 zu sehen rund um ein Fahrzeug mit mehreren LiDAR-Systemen positioniert werden kann. Dadurch können mehrere LiDAR-Systeme mit demselben LTS-Schirm getestet werden, wobei die unterschiedlichen Blickrichtungen der LiDAR-Systeme auf den LTS-Schirm berücksichtigt werden müssen. [GLRG21]

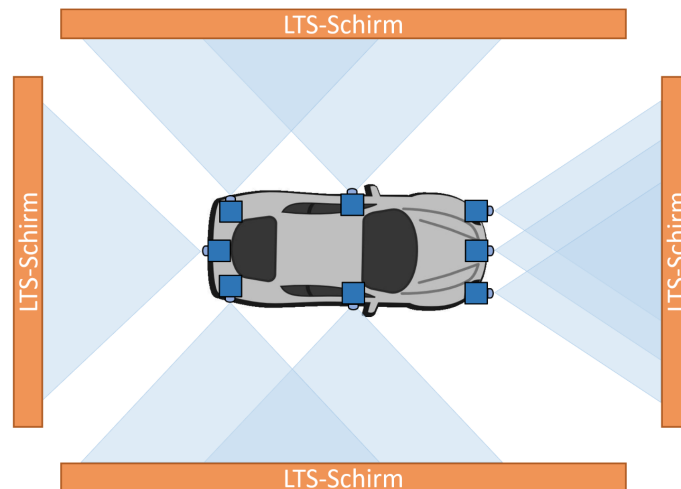


Abbildung 3: Test von mehreren LiDAR-Systemen eines Fahrzeugs mit dem gleichen LTS-Schirm möglich [Gro22]

Es gibt viele verschiedene LiDAR-Systeme mit unterschiedlichen Messmethoden. Der ATLAS *over-the-air* LiDAR-Zielsimulator ist für Systeme mit der Methode dToF (*direct time-of-flight*) LiDAR geeignet, deren Messprinzip in Abbildung 4a gezeigt ist. Diese LiDAR-Systeme senden einen kurzen Laserpuls aus, der von einem Objekt reflektiert und vom Detektor empfangen wird. Das LiDAR-System misst die Laufzeit (*time of flight*, ToF) dieses Laserpulses, welche proportional zur Objektdistanz ist. Neben den Laserpulsen selbst kann zusätzliches Licht auf dem Detektor auftreffen, das die LiDAR-Messung beeinflussen kann. Zwei Störszenarien sind in Abbildung 4b und 4c gezeigt. Das häufigs-

te Störszenario ist kontinuierliches Hintergrundlicht, das durch die Sonne ausgesendet und je nach vorherrschendem Wetter durch Wolken oder Regen moduliert wird. Darüber hinaus können LiDAR-Systeme sich gegenseitig stören, wenn sie das gleiche Objekt beleuchten. Dabei detektiert das Ego-System nicht nur sein eigenes Laserlicht, sondern auch den Laserpuls, der vom Aggressor-System ausgesendet wird. [Gro22]

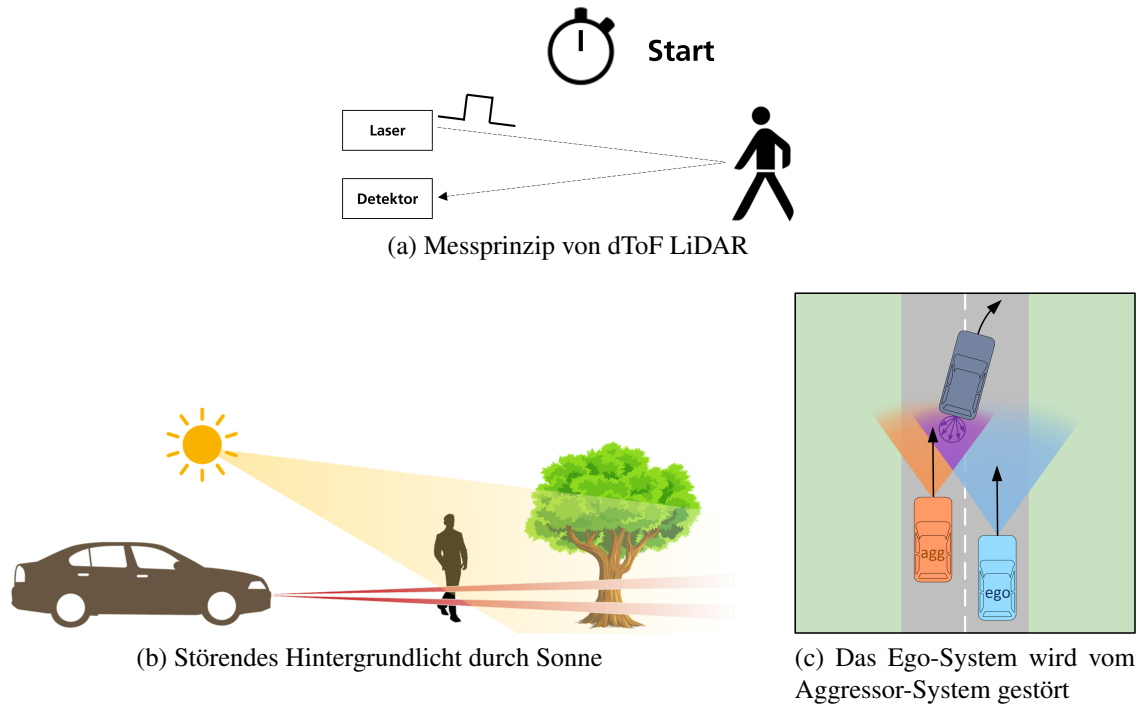


Abbildung 4: Prinzip einer LiDAR-Messung mit beispielhaften Störungen [Gro22]

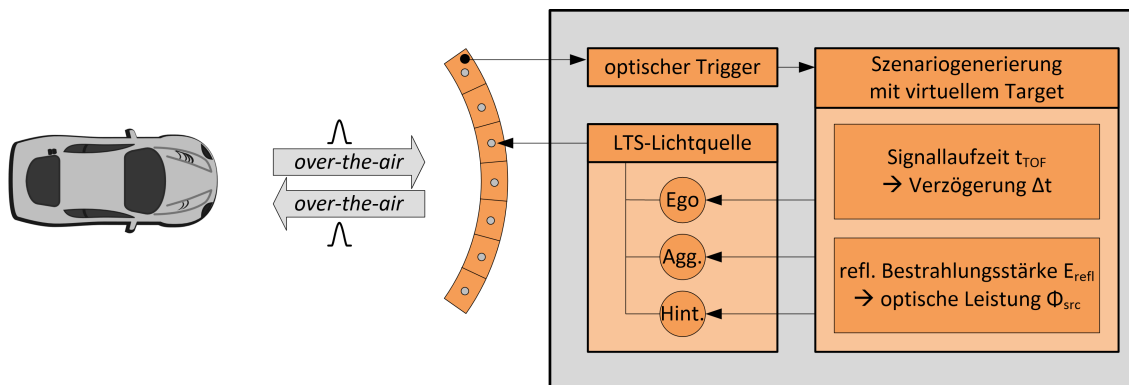


Abbildung 5: Funktionsweise des ATLAS *over-the-air* LiDAR-Zielsimulators [Gro22]

Der ATLAS *over-the-air* LiDAR-Zielsimulator bildet solche Szenarien nach dem Funktionsprinzip in Abbildung 5 nach. Das LiDAR-System am Fahrzeug sendet *over-the-air* einen Laserpuls zum LTS-Schirm aus, dessen Ankunftszeit mit einem optischen Trigger detektiert. Danach wird das gewünschte Szenario mit einem virtuellen Objekt generiert, wobei die Objektdistanz auf einer künstlichen Verzögerung des Signals basiert. Die vom virtuellen Objekt reflektierte Bestrahlungsstärke wird abhängig von der Objektdistanz und dem Reflexionsgrad des Objekts bestimmt. Zusätzlich kann diese optische Leistung für

den reflektierten Laserpuls eines virtuellen Aggressor-Systems und die Reflexion von virtuellem Hintergrundlicht unter Einfluss des Wetters ermittelt werden. Die verschiedenen Lichtmengen werden in einer LTS-Lichtquelle kombiniert und *over-the-air* zum LiDAR-System gesendet, das gerade getestet wird. [Gro22]

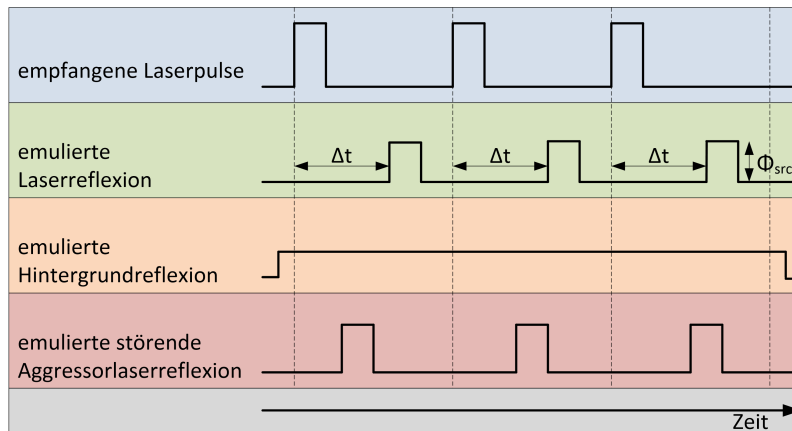


Abbildung 6: Zeitdiagramm des LiDAR-Zielsimulators [Gro22]

Als zeitlicher Ablauf ergibt sich das Zeitdiagramm in Abbildung 6. Das LiDAR-System sendet einen Laserpuls aus, der vom LiDAR-Zielsimulator empfangen wird. Für diesen Laserpuls wird eine Reflexion an einem virtuellen Objekt emuliert, indem ein Laserpuls mit einer zeitlichen Verzögerung von  $\Delta t$  und einer optischen Leistung  $\Phi_{src}$  zum LiDAR-System gesendet wird. Das virtuelle Hintergrundlicht tritt kontinuierlich auf, wird ebenfalls am virtuellen Objekt reflektiert und mit der daraus resultierenden optischen Leistung emuliert. Zusätzlich kann ein Aggressor-System angenommen werden, dessen Laserpuls zu einem anderen Zeitpunkt mit einer anderen optischen Leistung ausgesendet werden kann. [Gro22]

### 3 Demonstrator

Das Konzept des ATLAS *over-the-air* LiDAR-Zielsimulators wird als einkanaliger Demonstrator wie in Abbildung 7 realisiert. Mit diesem Demonstrator kann ein Pixel des LiDAR-Systems getestet werden. Als optischer Trigger wird ein Photodetektor eingesetzt, der den ankommenden Laserpuls des LiDAR-Systems detektiert. Anschließend wird dieses Signal mit einem Verzögerungsgenerator entsprechend der virtuellen Objektdistanz verzögert. Für einen virtuellen Aggressor-Laserpuls kann eine andere Verzögerung eingestellt werden. Als LTS-Lichtquelle werden zwei gepulste Laser zur Emulation des Ego- und Aggressor-Systems mithilfe eines Strahlteilers kombiniert sowie ein kontinuierlicher Laser, der Hintergrundlicht emuliert. Die optischen Leistungen aller drei Laser werden jeweils mithilfe von Neutraldichte-Filtern (ND-Filtern) eingestellt, die nur einen definierten Teil des Lichts transmittieren. Das kombinierte Licht aller drei Laser wird von der LTS-Lichtquelle *over-the-air* zum LiDAR-System ausgesendet. [Gro22]

Der realisierte Demonstrator ist in Abbildung 8 gezeigt. Getestet wird das LiDAR-System *Owl*, das vom Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Systeme und Schaltungen (IMS) entwickelt wurde. Das LiDAR-System arbeitet mit einer Wellenlänge von 905 nm und

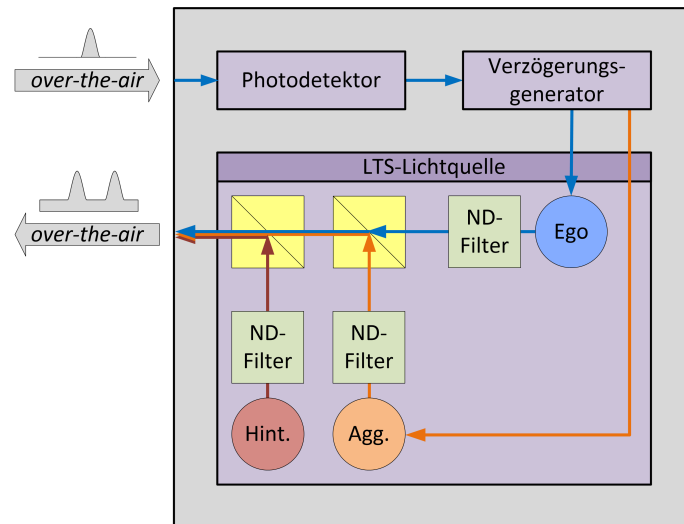


Abbildung 7: Konzept des einkanalen Demonstrators mit Ego-Laser, Aggressor-Laser und Hintergrundlicht-Laser [Gro22]

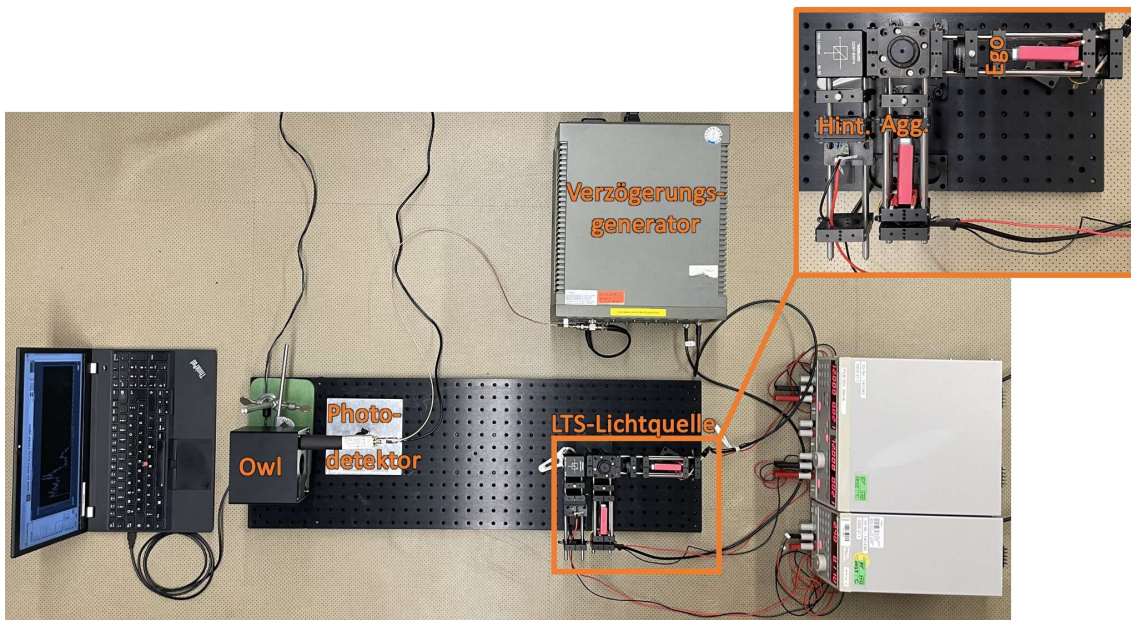
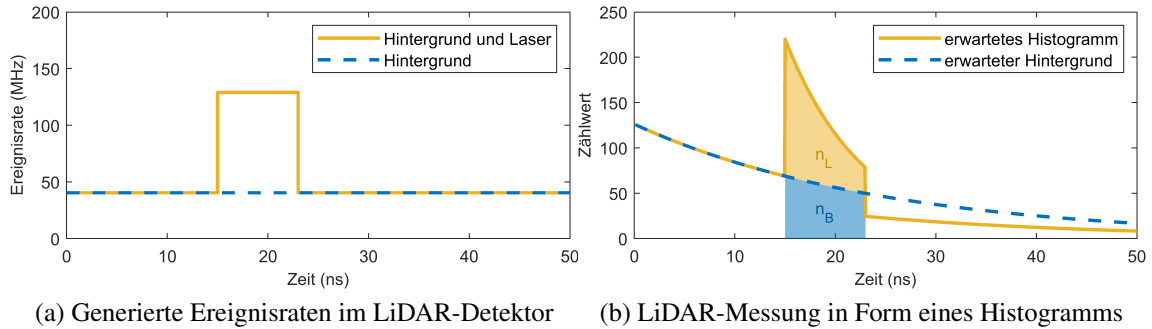


Abbildung 8: Aufbau des LTS-Demonstrators zum Test des LiDAR-Systems Owl [Gro22]

einer Pulsdauer von 8 ns. Die Zeitauflösung des Systems beträgt 312,5 ps, was einer Distanzauflösung von 4,7 cm entspricht. Im LiDAR-Zielsimulator wird ein Verzögerungs-generator genutzt, der Objektdistanzen in Schritten von 15 cm einstellen kann. Die LTS-Lichtquelle besteht aus einem gepulsten Ego-Laser, einem gepulsten Aggressor-Laser und einem kontinuierlichen Hintergrund-Laser. Äquivalent zum LiDAR-System haben alle drei Laser der LTS-Lichtquelle eine Wellenlänge von 905 nm und die beiden gepulsten Laser eine Pulsdauer von 8 ns. Die beiden gepulsten Laser werden vom Verzögerungs-generator getriggert, während der Hintergrund-Laser kontinuierlich läuft. Vor allen Lasern befinden sich ND-Filter zur Einstellung der Lichtintensität. Der Signalaustausch zwischen dem LiDAR-System und dem LTS findet *over-the-air* statt. [Gro22]

## 4 LiDAR-Tests



(a) Generierte Ereignisraten im LiDAR-Detektor (b) LiDAR-Messung in Form eines Histogramms

Abbildung 9: SNR aus Laser- und Hintergrundphotonen  $n_L$  und  $n_B$  als Gütekriterium für Detektierbarkeit der Objektdistanz aus dem LiDAR-Histogramm [Gro22]

Mithilfe des Demonstrators können verschiedene LiDAR-Messungen im LiDAR-System *Owl* generiert werden. In Abbildung 9 ist eine dToF-LiDAR-Messungen unter der Annahme eines rechteckigen Laserpulses gezeigt. Eine dToF-LiDAR-Messung besteht aus einem Histogramm, in dem die gemessenen Signallaufzeiten von vielen einzelnen LiDAR-Messungen akkumuliert werden. Bei jeder Einzelmessung wird vom reflektierten Laserpuls jeweils das erste Photon detektiert, sodass sich im Histogramm ein exponentieller Verlauf des ursprünglich konstanten Signals ergibt, was Pile-Up-Effekt genannt wird [Coa68][GIVG19][PLT<sup>+</sup>20]. Aus diesem Histogramm wird die Objektdistanz ermittelt. Ein Gütekriterium für die Detektierbarkeit der Objektdistanz ist das Signalrauschverhältnis (*signal-to-noise ratio*, SNR), welches das Verhältnis vom Signal zum Rauschen im Histogramm angibt. Das Signal besteht aus der Anzahl detektierter Laserphotonen  $n_L$ , während sich das Rauschen aus den Fluktuationen der detektierten Laser- und Hintergrundphotonen  $\sqrt{n_L + n_B}$  zusammensetzt [PBS<sup>+</sup>00]. Das SNR muss hinreichend groß sein, damit ein LiDAR-System die Objektdistanz erfolgreich aus dem Histogramm bestimmen kann. [Gro22]

Mit dem LTS-Demonstrators werden LiDAR-Messungen mit unterschiedlichem SNR erzeugt, die in Abbildung 10 zu sehen sind. Es werden drei verschiedene Hintergrundintensitäten eingestellt, die im LiDAR-Detektor moderate Ereignisraten von 8 MHz, 20 MHz und 40 MHz erzeugen. Für jeden Hintergrund werden unterschiedlich starke Lasersignale mithilfe von ND-Filtern mit Transmission  $T$  generiert. Die erzeugten SNR-Werte stimmen mit der erwarteten Theorie überein. Anschließend wird mit dem LTS-Demonstrator zusätzlich eine Störung durch ein virtuelles Aggressor-System emuliert. Die resultierende Messung vom LiDAR-System ist in Abbildung 11 zu sehen. In der Messung sind alle drei emulierten Signale gut zu erkennen: Hintergrundlicht, Aggressor-Signal und Ego-Signal. Insgesamt konnten also erfolgreiche verschiedene Szenarien durch den LTS-Demonstrator für das LiDAR-System generiert werden. [Gro22]

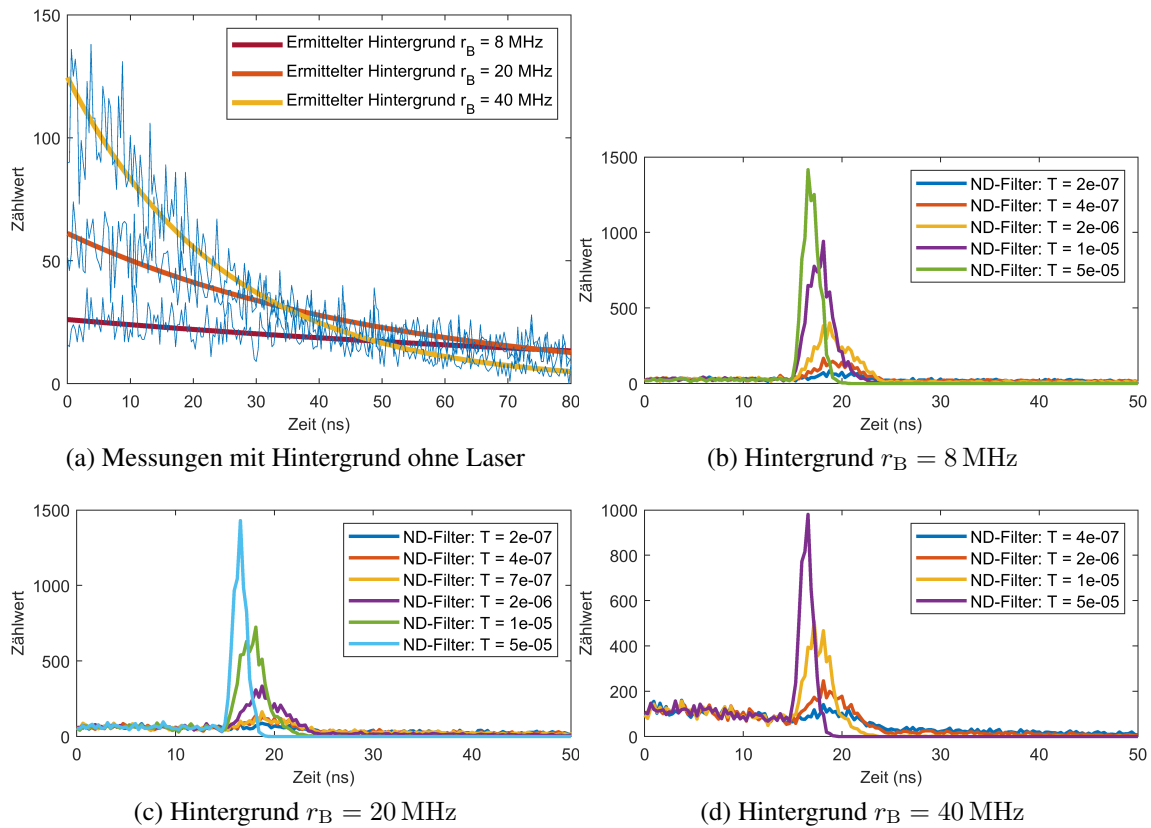


Abbildung 10: LTS-Demonstrator generiert LiDAR-Messungen mit unterschiedlichem SNR durch verschiedene Hintergrund- und Laserintensitäten [Gro22]

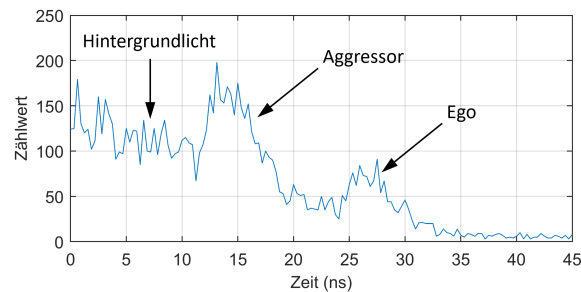


Abbildung 11: LTS-Demonstrator generiert LiDAR-Messung mit Störung durch ein virtuelles Aggressor-System [Gro22]

## 5 Zusammenfassung

Das Konzept des ATLAS *over-the-air* LiDAR-Zielsimulators für dToF LiDAR konnte erfolgreich für ein Pixel demonstriert werden. Der LiDAR-Zielsimulator ist skalierbar, sodass das gesamte LiDAR-System zukünftig mit allen Pixeln getestet werden kann. Es konnte gezeigt werden, dass verschiedene LiDAR-Tests durchführbar sind wie die Einstellung unterschiedlich gut detektierbarer Signale basierend auf dem SNR, Robustheit gegen Hintergrundlicht und Robustheit gegen Störungen durch andere LiDAR-Systeme. Damit stellt das präsentierte Konzept des ATLAS *over-the-air* LiDAR-Zielsimulators ein vielversprechendes LiDAR-Testsystem dar.



## Literatur

- [Ald] Aldenhoven Testing Center. <https://www.aldenhoven-testing-center.de/de/>.
- [Coa68] P. B. Coates. The correction for photon ‘pile-up’ in the measurement of radiative lifetimes. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1(8):878–879, 1968.
- [DIO] DIOPTIC GmbH. LIDAR - Light Detection and Ranging. <https://www.dioptic.de/lidar/>.
- [dSP] dSPACE. AURELION Lidar Model. [https://www.dspace.com/en/ltd/home/products/sw/experimentandvisualization/aurelion\\_sensor-realistic\\_sim/aurelion\\_lidar.cfm](https://www.dspace.com/en/ltd/home/products/sw/experimentandvisualization/aurelion_sensor-realistic_sim/aurelion_lidar.cfm).
- [GIVG19] Anant Gupta, Atul Ingle, Andreas Velten und Mohit Gupta. Photon-Flooded Single-Photon 3D Cameras. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Seiten 6763–6772, 2019.
- [GLRG21] Sara Grollius, Manuel Ligges, Jennifer Ruskowski und Anton Grabmaier. Concept of an Automotive LiDAR Target Simulator for Direct Time-of-Flight LiDAR. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 11 2021.
- [Gro22] Sara Grollius. *Recognition and Suppression of Interference Between SPAD-Based Direct Time-of-Flight Systems*. Unveröffentlichte Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2022.
- [IPG21] IPG Automotive GmbH. CarMaker. <https://ipg-automotive.com/de/produkte-services/simulation-software/carmaker/>, 2021.
- [Lab] Labsphere. Permaflect Targets: Rigid, Lidar, Commercial. <https://www.labsphere.com/labsphere-products-solutions/materials-coatings-2/targets-standards/permaflect-ii-targets/>.
- [PBS<sup>+</sup>00] Sara Pellegrini, Gerald S. Buller, Jason M. Smith, Andrew M. Wallace und Sergio Cova. Laser-based distance measurement using picosecond resolution time-correlated single-photon counting. *Measurement Science and Technology*, 11(6):712–716, 03 2000.
- [PLT<sup>+</sup>20] Klaus Pasquinelli, Rudi Lussana, Simone Tisa, Federica Villa und Franco Zappa. Single-Photon Detectors Modeling and Selection Criteria for High-Background LiDAR. *IEEE Sensors Journal*, 20(13):7021–7032, 07 2020.