

Messsystem zur Charakterisierung von LiDAR-Scaneinheiten für Autonomes Fahren

Valentin Baier

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Computation, Information and Technology der Technischen Universität München zur Erlangung eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. rer. nat. Gabriele SCHRAG

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Alexander W. KOCH
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Erwin BIEBL

Die Dissertation wurde am 06.12.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Computation, Information and Technology am 10.06.2024 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Wissenschaftliche Problemstellung	2
1.3	Inhalt der Arbeit	3
2	Autonomes Fahren und die Notwendigkeit von LiDAR-Sensoren	5
2.1	Stand der Technik des autonomen Fahrens	5
2.1.1	Aktueller Entwicklungsstand autonomer Fahrzeuge	5
2.1.2	Definition des autonomen Fahrens	6
2.2	Fahrerassistenzsysteme und Sensorik	7
2.2.1	Stand der Technik der Fahrerassistenzsysteme	7
2.2.2	Stand der Technik der Sensorik	9
2.3	Prognose zur zukünftigen Entwicklung	12
3	Die LiDAR-Technologie	15
3.1	Funktionsweise von LiDAR-Sensoren	15
3.1.1	Übersicht zu LiDAR-Sensoren	15
3.1.2	Konzepte zur Abstandsmessung	17
3.1.3	Konzepte zur 3D-Abtastung	20
3.2	Charakterisierung von LiDAR-Systemen	24
3.2.1	Reichweite (Range)	24
3.2.2	Bildrate (Framerate)	29
3.2.3	Sichtbereich (Field of View)	29
3.2.4	Auflösung (Resolution)	30
3.3	Einteilung kommerzieller LiDAR-Sensoren	31
3.3.1	Gruppierung nach Technologie	32
3.3.2	Marktanalyse	33
4	Ableitung von Anforderungen für LiDAR-Sensoren	35

4.1	Einschränkung des Einsatzbereichs: Autobahn	35
4.2	Stand der Technik der Anforderungen	36
4.2.1	Anforderungen an die Straßenführung	36
4.2.2	Anforderungen an autonome Fahrzeuge und die verwendete Sensorik	41
4.2.3	Stand der Forschung zu LiDAR-Anforderungen	45
4.3	Bestimmung der Leistungsparameter	46
4.3.1	Übersicht der kritischen Szenarien	46
4.3.2	Charakteristiken der Auflösung	47
4.3.3	Detektionsraten	49
4.3.4	Bildrate	55
4.3.5	Reichweite	56
4.3.6	Horizontale und vertikale Auflösung	58
4.3.7	Vertikales Sichtfeld	58
4.3.8	Horizontales Sichtfeld	62
4.4	Diskussion der resultierenden Leistungsparameter	66
4.4.1	Vergleich der Ergebnisse mit dem Stand der Technik	66
4.4.2	Bedeutung der Anforderungen für eine MEMS-Scaneinheit	68
4.4.3	Anforderungen für ein Messsystem einer Scaneinheit	72
5	Messstand für MEMS-Scaneinheiten	75
5.1	Stand der Technik	75
5.1.1	Kalibrierung und Vermessung von LiDAR-Systemen	75
5.1.2	Vermessung von Ablenkwinkeln	76
5.1.3	Verwendung von positions sensitiven Detektoren	79
5.2	Messmethodik	83
5.2.1	Messprinzip und -aufbau	83
5.2.2	Berechnung des Ablenkwinkels	84
5.3	Statische Kalibration des Messsystems	87
5.3.1	Kalibrationsaufbau	88
5.3.2	Methodik zur Berechnung	89
5.3.3	Ergebnisse der Kalibrierung	93
5.4	Statische Validierung	96
5.4.1	Übersicht und Methodik	97
5.4.2	Bestimmung der Messunsicherheit	98
5.4.3	Ergebnisse der statischen Validierung	99
5.4.4	Theoretische Messauflösung	105
5.5	Dynamische, MEMS-basierte Validierung	106
5.5.1	Übersicht und Methodik	106

5.5.2	Ergebnisse der dynamischen Messung des Messsystems	108
5.5.3	Vergleich des horizontalen FoVs mit der Referenz	116
6	Diskussion der Forschungsergebnisse	119
6.1	Messsystemspezifikation in Bezug auf die Anforderungen	119
6.1.1	Erkenntnisse aus der statischen Validierung	120
6.1.2	Erkenntnisse aus der dynamischen Validierung	121
6.1.3	Vergleich mit dem Stand der Technik	122
6.2	Designvarianten und Optimierungspotential	122
6.2.1	Optimierungspotential und theoretische Limitierung	122
6.2.2	Designvarianten des Messsystems	124
7	Zusammenfassung und Ausblick	127
	Symbolverzeichnis	129
	Abkürzungsverzeichnis	133
	Abbildungsverzeichnis	137
	Literaturverzeichnis	141
	Eigene Veröffentlichungen	157
	Betreute studentische Arbeiten	157

Kapitel 1

Einleitung

Dieses Kapitel soll das Forschungsvorhaben dieser Dissertation einleiten. Dazu ordnet es dieses zeitlich und technisch der industriellen und forschungsbezogenen Entwicklung zu. Daraus entspringt die Motivation und die wissenschaftliche Problemstellung. Diese zeigt die notwendigen Schritte, die im Laufe der Promotion untersucht worden sind und in dieser Arbeit behandelt werden. Letztlich wird der Inhalt der nachfolgenden Kapitel beschrieben.

1.1 Motivation

Die Automation von Fahrzeugen steigt kontinuierlich durch die Integration von zusätzlichen technischen Systemen von Informationsquellen hin zu unterstützenden Methoden. Beispiele hierfür sind Spurhalteassistenten, Bremsassistenten und Tempomaten [12]. Für fahrerlose Automation sind insbesondere 3D-LiDAR-Sensoren („Light Detection and Ranging“) für die Umweltdetektion von Nöten, die mit bereits erhältlicher Sensorik fusioniert werden müssen.

LiDAR-Sensoren ermöglichen eine laserbasierte Abstandsmessung, die sich im Besonderen durch ihre hohe Reichweite, Genauigkeit und Unempfindlichkeit gegenüber Störsignalen auszeichnet. Moderne Entwicklungen in diesem Feld führten zu Sensoren, die durch Abtasteinheiten bzw. Scaneinheiten das gesamte Umfeld erfassen können. Diese Art von Sensor wird als 3D-LiDAR bezeichnet. Wie am Beispiel von Daimler zu sehen ist, verwenden aktuell kommerziell erhältliche Fahrzeuge diese Art von Sensorik [128].

Obwohl LiDAR-Sensoren schon jetzt verbaut werden, ist zum Zeitpunkt dieser Arbeit unklar, welche Funktionalität und welche Leistungsparameter relevant sind und erfüllt werden müssen. Zwar bestehen vereinzelte Anforderungen an Fahrassistenzsysteme und abgeleitete Größen aus wissenschaftlichen Publikationen, diese lassen sich allerdings nicht

direkt auf die Sensorik übertragen. Zu bestehende Fahrmanöver sind teilweise schon durch die Rechtslage der Europäischen Union [40] oder Euro NCAP [148] definiert, decken derzeit aber nur einen limitierten Einsatzbereich ab. Dies trifft insbesondere auf Autobahnen und hohe Geschwindigkeiten zu.

Neben der genauen Spezifizierung von 3D-LiDAR-Systemen gibt es aufgrund der Neuheit eine Vielzahl von messtechnischen Herausforderungen. Insbesondere die genaue Kalibration und Charakterisierung und Vermessung der Strahlableitung ist in diesem Zusammenhang kritisch. Die Technologie MEMS (kurz für „Micro electro mechanical system“) erfährt dabei großes Interesse, da durch die Skalierbarkeit potentiell kostengünstige Produkte erzielt werden können [120]. Die Charakterisierung solcher Einheiten für den Automobilmarkt stellt aufgrund des Umfangs somit eine große Herausforderung dar.

1.2 Wissenschaftliche Problemstellung

In Hinblick auf die Motivation lassen sich für diese Dissertation folgende zwei grundlegende Problemstellungen finden:

- **Anforderungen an ein LiDAR-System.** Basierend auf aktuell geltendem Recht, Richtlinien und Testspezifikationen Dritter wird eine Anforderung für die Leistungsparameter von LiDAR-Sensoren für den Einsatz auf Autobahnen aufgestellt. Spezielle Szenarien und Detektionswahrscheinlichkeiten müssen miteinbezogen werden, um eine möglichst realistische Anforderung aufstellen zu können. Diese spezifizieren dann das Sichtfeld, die Bildwiederholrate, die Reichweite und die Auflösung.
- **Teststand zur Vermessung von LiDAR-MEMS-Scannern.** Abgeleitet von den Spezifikationen eines LiDARs gilt es, ein Messsystem zu entwickeln, das in der Lage ist, den Ablenkwinkel eines MEMS-Scanners im dynamischen Betrieb zu charakterisieren. Die folgenden Charakteristika des Messsystems sind dabei von besonderer Bedeutung:
 - **Messbereich:** Das Messsystem muss in der Lage sein, die LiDAR-MEMS-Scanner über den gesamten Schwingungsbereich zu vermessen. Um auch große Ablenkwinkel bestimmen zu können, muss das System einen großen Messbereich besitzen.
 - **Auflösung.** Trotz eines großen Messbereichs muss das System in der Lage sein, kleinste Winkeländerungen zu detektieren und damit eine hohe Auflösung bieten.

- **Abtastrate:** Bei der Anforderung des großen Messbereichs mit hoher Auflösung muss der Teststand in der Lage sein das dynamische Schwingungsverhalten bei hohen Oszillationsfrequenzen des Scanners aufzunehmen.
- **Messzeit:** Der Teststand muss einen Prüflingswechsel ohne zeitaufwendige Neujustage ermöglichen, um perspektivisch auch in der Industrie eingesetzt werden zu können. Es ist eine Methode zu entwickeln, die aus der Ablenkbewegung auf die Einbaustellung schließen lässt.

1.3 Inhalt der Arbeit

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die Gliederung der Arbeit geben.

Im folgenden Kapitel 2 wird auf das autonome Fahren im Allgemeinen eingegangen. Die Entwicklung der einzelnen Funktionalitäten von Fahrerassistenzsystemen und die notwendige Sensorik werden als Grundlage beschrieben. Der Stand der Technik wird dargestellt.

Daran angrenzend fokussiert sich Kapitel 3 auf die LiDAR-Technologie. Die theoretischen und technischen Hintergründe werden erörtert; zugleich wird der Stand der Technik und die damit verbundenen Methoden und Baukonzepte diskutiert. Eine Übersicht der kommerziell erhältlichen Produkte schließt das Kapitel ab.

Ein LiDAR-Sensor für die Verwendungen auf Autobahnen und im speziellen dessen Leistungsparameter werden in Kapitel 4 hergeleitet. Diese Herleitung basiert auf dem Stand der Technik der Reglementierung und Versuchsdurchführung von Testszenarien. Werte für das Sichtfeld, die Auflösung, die Bildwiederholrate und Reichweite werden im einzelnen abgeleitet und führen letztlich zu Anforderungen an MEMS-Scaneinheiten und an einen Teststand.

Kapitel 5 beinhaltet die Entwicklung eines Messstands für LiDAR-MEMS-Scaneinheiten. Abgrenzend zum Stand der Technik wird der Aufbau des Messsystems und dessen Funktionsweise beschrieben. Die weiteren Unterkapitel verdeutlichen die statische Kalibration sowie die statische und dynamische, MEMS-basierte Validierung des Teststands.

Eine Diskussion der erreichten Leistungsparameter und das Optimierungspotential finden sich in Kapitel 6. Hier wird außerdem auf zwei Designvarianten eingegangen, die je nach Einsatzbereich andere Vorteile bieten können.

Die Zusammenfassung bildet den Abschluss der Arbeit. Sie ordnet die Ergebnisse in Bezug

auf die wissenschaftliche Problemstellung ein und verdeutlicht die nächsten forschungsrelevanten Schritte und Einsatzbereiche.

Kapitel 2

Autonomes Fahren und die Notwendigkeit von LiDAR-Sensoren

Einleitend soll dieses Kapitel aufzeigen, was autonomes Fahren bedeutet, in welcher Form schon jetzt autonom bzw. assistiert gefahren wird und welche Konzepte existieren. Weiterführend wird dargestellt, welche Sensorik zum Stand der Technik gehört, wie und wo sie integriert ist und wie sie technisch aufgebaut ist. Anhand von Marktanalysen wird letztlich prognostiziert, wann und wie sich autonome Fahrzeuge etablieren und welche Bedeutung LiDAR-Sensoren dabei besitzen.

2.1 Stand der Technik des autonomen Fahrens

Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die zeitliche Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und relevanten Ereignissen der Forschung. Außerdem wird die Definition der insgesamt sechs Stufen erklärt und die Abgrenzung zwischen assistiert, automatisiert und autonom verdeutlicht.

2.1.1 Aktueller Entwicklungsstand autonomer Fahrzeuge

Der Grundstein des autonomen Fahrens bilden Fahrerassistenzsysteme (Englisch: Advanced Driver Assistance Systems, ADAS). Erste Implementierungen, wie Antiblockiersysteme (ABS), unterstützen den Fahrer nur unter schwierigen Witterungsbedingungen aktiv, während es inzwischen Funktionen gibt, die aktiv einparken oder zukünftig auch autonomes Fahren ohne Fahrereingriffe ermöglichen sollen. Eine Übersicht über die zeitliche Entwicklung ist 2014 von Bengler et al. veröffentlicht worden [12]. Diese wird im Folgenden kurz zusammengefasst.

Systeme im späten 20. Jahrhundert hatten nach [12] das Ziel, das Fahrzeug zu stabilisieren, was z. B. durch ABS realisiert worden ist. Zwischen 1990 und 2010 ist eine Phase der Information, Warnung und des Komforts beschrieben. Funktional entwickelte sich die Funktionalität von Autos hin zu Navigationssystemen und Parkassistenten als auch Spurhaltesystemen (Lane Keeping System, LKS) und Tempomaten (Adaptive Cruise Control, ACC). Dies wird durch eine Vielzahl von Sensoren, wie Kameras, Radare und LiDAR möglich gemacht. Heutzutage zielt die Forschung und Entwicklung auf Autonomie. Systeme wie LKS und ACC umfassen kontinuierlich weitreichendere Straßenbedingungen und Szenarios, während neue Mechanismen Kollisionen vermeiden (Collision Avoidance System, CAS) und die Aufmerksamkeit des Fahrers prüfen. Einzelne Sensoren bilden Sensornetzwerke, die zentral verarbeitet werden (Sensorfusion). Letztlich - nachdem Fahrzeuge autonom von Tür zu Tür navigieren können - sollen Autos effizienter fahren, miteinander kommunizieren und somit sicherer und umweltfreundlicher werden. [12]

2.1.2 Definition des autonomen Fahrens

Verwandt zu der deutschen Einteilung des VDA (Verband der deutschen Automobilindustrie) und des BAST (Bundesamt für Straßenbau) hat die amerikanische SAE (Society of Automotive Engineers) 2014 die ursprüngliche Definition ausgeweitet [18]. Neben den Bereichen des assistierten, automatisierten und autonomen Fahrens, ist die Definition darin auf sechs Stufen aufgegliedert worden, welche im Folgenden basierend auf [107] beschreiben werden.

Beginnend bei Stufe 0 werden Fahrzeuge bezeichnet, die keinerlei unterstützende oder automatisierte Funktionen bieten. Der Mensch ist vollständig für die Führung des Fahrzeugs verantwortlich.

Stufe 1, die Fahrerunterstützung („Driver Assistance“), beschreibt Systeme, die einzelne Fahrmanöver, wie die Beschleunigen oder das Lenken übernehmen, während der Fahrer für den Rest verantwortlich ist.

Ähnlich dazu werden in Stufe 2, der partielle Fahrautomatisierung („Partial Driving Automation“), sowohl longitudinale als auch laterale Bewegungen des Autos durch das System kontrolliert. Der Fahrer muss weiterhin aufmerksam sein und auf Objekte oder unerwartete Ereignisse reagieren. Stufe 1 und 2 sind unter der Definition des VDA und des BAST als „assistiert“ zusammengefasst.

Bei einer beschränkten Fahrautomatisierung („Conditional Driving Automation“, Stufe 3) werden gesamte Fahrmanöver durch das System durchgeführt. Dieses detektiert dann zusätzlich Hindernisse während des Vorgangs. Sollte der Betriebsbereich des Systems dabei verlassen werden, wird der Fahrer benachrichtigt, um die Situation zu übernehmen.

Eine Hochautomatisierung, wie sie in Stufe 4 definiert ist, beschreibt ein Fahrzeug, das innerhalb von speziellen Szenarien oder Einsatzbereichen immer selbstständig manövriert, Probleme detektiert und in solchen Fällen selbstständig interveniert. Dieses System ist nicht mehr auf einen Fahrer angewiesen, was beliebige neue Fahrzeugkonzepte ermöglicht. Ab Stufe 4 definieren VDA und BAST entsprechende Systeme als „autonom“.

Die Vollautomatisierung („Full Driving Automation“), ist Stufe 5. Im Vergleich zur vorangegangenen Stufe ist das System hier für alle Einsatzbereiche des Fahrens geeignet und nicht auf spezielle Szenarien limitiert.

2.2 Fahrerassistenzsysteme und Sensorik

In diesem Unterkapitel wird auf den Stand der Technik von Fahrerassistenzsystemen und der verwendeten Sensorik eingegangen. Die Einsatzbereiche und physikalischen Hintergründe werden beschrieben.

2.2.1 Stand der Technik der Fahrerassistenzsysteme

Heute erhältliche Fahrzeuge bieten eine Suite von Funktionen. So finden sich Systeme, wie ABS oder ACC, bereits in den meisten Kleinwägen, während die Oberklasse zusätzlichen Komfort mit z. B. Spurhaltesystemen (LKS) oder Notbremsassistent (CAS) verspricht. Abbildung 2.1 ([13], basierend auf [73]) illustriert den Ort des Einbaus, die Technologie und die erzielte Funktionalität. Im folgenden wird auf die wichtigsten Fahrerassistenzsysteme eingegangen.

Notbremsassistent

Notbremsassistenten sollen Auffahrunfälle durch aktive Bremsung des Fahrzeugs vermeiden. Je nach Hersteller finden sich dafür Bezeichnungen wie „Front Assist“, „Pre-Sense Plus“ oder „Pre-Collision System“ [113]. Allgemein sind diese Systeme als Notbremsassistent oder „Collision avoidance system“ (CAS) deklariert. Nach UNECE 131 wird diese Art der Funktionalität als „Advanced Emergency Braking System“ (AEBS) bezeichnet [40] und reglementiert.

Zur Detektion voranfahrender Fahrzeuge werden Infrarot-Kameras und Radare verwendet [113]. Eine tiefere Integrierung mit der Erfassung durch LiDAR ist insbesondere für kleine Objekte relevant [73].

Abstandsregeltempomat (ACC)

Eine wichtige ADAS-Funktionalität ist der Abstandsregeltempomat. Im Englischen wird dieser als „Adaptive Cruise Control“ (ACC) bezeichnet. Wählt der Fahrer seine Wunsch-

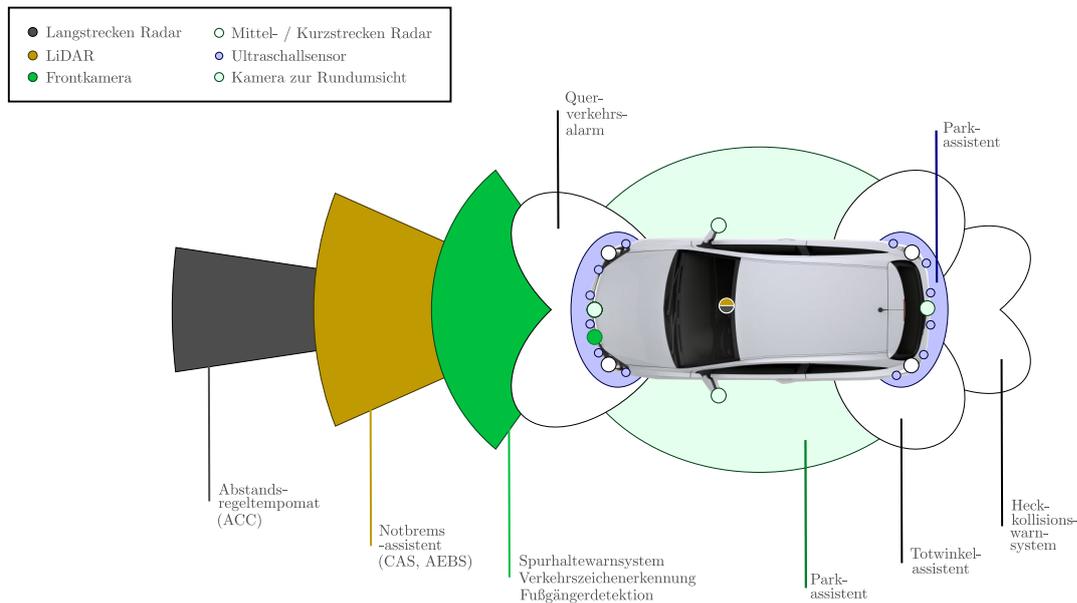


Abbildung 2.1: Verbaute Sensoren und deren Verwendung für ADAS ([13], basierend auf ©2022 [73] IEEE).

geschwindigkeit, so regelt das System bei freier Straße auf diese ohne Zutun des Fahrers. Taucht ein anderes Fahrzeug vor dem eigenen Auto auf, so wird dieses mit ACC erkannt und die Geschwindigkeit so reduziert, dass der notwendige Sicherheitsabstand immer gewährleistet ist. Ziel der Regelung ist es, so nah wie möglich mit der eingestellten Sollgeschwindigkeit zu fahren und gleichzeitig den Sicherheitsabstand zu wahren, ohne plötzliche oder abrupte Beschleunigungsmanöver zu erzeugen [113]. Die Verwendung entlastet den Fahrer und kann zu einer Treibstoffreduktion führen. Erste Implementierungen durch die Automobilhersteller fanden sich um das Jahr 2000 [113]. Diese detektierten voranfahrende Autos mittels Radaren oder laserbasierten Abstandsmessern. Heutzutage werden neben Radaren häufig auch Kameras und zum Teil auch LiDAR-Systeme verwendet. Zukünftig wird diese Funktion auf das Ausweichen und automatisches Überholen ausgeweitet. Gleichzeitig ermöglicht die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander das sogenannte „Platooning“, bei dem die kollektive Wahrnehmung minimale Abstände bei hohen Geschwindigkeiten erlaubt [95].

Spurhalteassistenten

Spurhaltewarnsysteme (Lane Departure Warning System, LDWS) gelten als erste Generation dieser Technologie. Eingebaute Kameras zeichnen dabei die Fahrbahn vor dem

Fahrzeug auf und identifizieren die Spurmarkierungen [113]. Kommt es zu einer Annäherung oder Überschreitung dieser, wird der Fahrer gewarnt. Heutzutage nutzt das System die Informationen, um die laterale Position des Fahrzeugs aktiv anzupassen und gegenzusteuern. Hierzu werden neben Mono-Kameras auch Stereo-Kameras und zukünftig unter Umständen auch LiDAR-Systeme verwendet [73].

Eine Kombination dieser Funktion und des ACC stellen aktuell „Automated Lane Keeping Systems“ (ALKS) dar, wie sie nach UNECE 157 definiert sind [41]. Als erstes Level 3 Fahrzeug erschien damit 2022 die aktuelle S-Klasse von Mercedes-Benz [128].

Parkassistent

Die erste kommerziell erhältliche Version eines Parkassistenten fand sich 2003 im Toyota Prius [113]. Eine Vielzahl von Radaren ermöglichte die genaue Pfadberechnung: Der Fahrer kontrollierte die Beschleunigung, während das Fahrzeug aktiv lenkt. Heutzutage können Fahrzeuge auf Knopfdruck ohne Fahrer autonom einparken. Diese Funktionalität wird insbesondere durch zusätzliche Ultraschallsensoren [73] und durch Kameras [27] ermöglicht.

Weitere Funktionen

Neben den oben genannten Fahrzeugassistenten finden sich heute noch viele weitere. Zu diesen gehören z. B. die Überwachung des Totwinkels durch zusätzliche Kameras [57] oder Nahfeld-Radare [73]. Dies ist insbesondere für Spurwechsel von LKWs relevant.

Die Straßenschild- und Fußgängererkennung gewinnen an Relevanz. Die Funktionen beruhen dafür maßgeblich auf kamerabasierter Detektion durch „Machine Learning“ [69, 73]. Kombination aus verschiedenen Kameratechnologien und LiDARen werden ebenso für diesen Einsatz erforscht [73].

Im inneren von Fahrzeugen werden Kameras für Aufmerksamkeitsassistenten („Drowsiness detection“) verwendet. Diese überwachen unter anderem die Kopf- und Augenbewegung des Fahrers, um bei Anzeichen von Ermüdung oder Unaufmerksamkeit zu alarmieren [84]. Zukünftig sollen so zusätzlich biomedizinische Daten über den Fahrer erhoben werden [113].

2.2.2 Stand der Technik der Sensorik

Dieses Unterkapitel soll einen komprimierten Einblick über die Funktionsweise der für ADAS notwendigen Sensortechnologie geben. Aufbau, Funktionalität und Erhältlichkeit von Kameras, Ultraschall-Sensoren, Radaren und LiDARen werden beschrieben.

2.2.2.1 Kamera

Kamerabasierte Umgebungserkennung ist die günstigste und am weitest verbreitete Methode, um Fahrzeuge intelligenter zu gestalten. Sie sind rundherum um das Fahrzeug verbaut und ermöglichen so viele ADAS-Funktionen, wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist. Nach Dabral et al. [27] lassen sich die verschiedenen Einsatzszenarien in vorwärts gerichtet, rückwärts gerichtet, Rundumsicht (auch Surround View System genannt), Kameraüberwachungssystem (Camera Monitoring System, CMS) als Ersatz der Außenspiegel und in Fahrer-Überwachungs-System unterteilen.

Die vorwärts gerichteten Kameras basieren auf Mono- oder Stereo-Kameras und dienen so zur Detektion von Fußgängern oder Straßenschilder und ermöglichen ADAS-Funktionen wie LDWS, ACC und AEB. Im Gegensatz dazu sind rückwärts gerichtete Kameras hauptsächlich zur Anzeige und als Informationsquelle vorhanden. Mit Weitwinkel-Objektiven wird dabei ein möglichst großes Sichtfeld um das Fahrzeug herum abgebildet. Eine Rundumsicht um das Auto ist insbesondere für automatisierte Manöver, wie das autonome Einparken von Nöten. Dazu werden z. B. vier bis sechs Kameras mit Fisheye-Objektiven um das Fahrzeug herum verbaut. Kamera-Monitoring-Systeme sollen Totwinkel durch ein großes FoV [57] abdecken.

Die Vielfältigkeit der Anwendungen und notwendigen Spezifikationen führt dazu, dass Kamera-Module unterschiedlich ausgeprägt sind. Was alle Module gemeinsam haben, ist deren prinzipieller Aufbau. Dieser besteht aus einem Kamera-Sensor, einer Gruppe aus optischen Linsen sowie Filtern, der Elektronik und einem Gehäuse [139]. Die Sensortechnologie basiert dabei meistens auf CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) und variiert je nach Anwendungsfall nur in der Größe, Auflösung und dem Dynamikumfang. Optische Elemente, wie Linsen und Filter, werden auf das notwendige Sichtfeld und den Wellenlängenbereich für minimale Abbildungsfehler ausgewählt und optimiert. Verbaute Stereokameras bieten so beispielsweise einen Sichtbereich von 80° und eine Bildwiederholrate von 30 Hz [59].

2.2.2.2 Ultraschall

Ultraschallsensoren werden ausschließlich zur Abstandsmessung des nahen Umfelds und damit hauptsächlich für Park-Manöver eingesetzt [66]. Hierzu sind in den Stoßstangen vier bis sechs Sensoren verbaut, deren Sichtbereiche sich überschneiden, um durch Trilateration die Position von Objekten zu berechnen. Die Distanzmessung jedes einzelnen Sensors beruht auf der Laufzeitmessung, bei der die Umlaufzeit des ausgesandten und reflektierten Ultraschallsignals bei ca. 50 kHz [66] gemessen wird. Typische Sensoren von z. B. Bosch benutzen als Sender und Empfänger die gleiche Piezoelektrik, welche an einem metallischen Diaphragma verklebt ist [139]. Einzelne Sensoren erreichen so Reichweiten bis 5,5 m bei

einer minimalen Reichweite von 0,15 m und einem Sichtbereich von $80^\circ \times 50^\circ$ [14]. Zusätzlich wird außerdem auch an Straßenoberflächenvermessung durch Ultraschallsensoren geforscht [19].

2.2.2.3 Radar

Ursprünglich für militärische Zwecke während des zweiten Weltkriegs entwickelt, fand sich die Technologie Radar erstmals 1998 als Sensor in Fahrzeugen für ACC [139]. Radare (von radio detection and ranging) verwenden zur Abstandsmessung modulierte Radiowellen mit Wellenlängen im Milli- bis Zentimeterbereich. In Fahrerassistenzsystemen werden dabei hauptsächlich zwei Trägerfrequenzen gewählt: bei ca. 24 GHz oder bei ca. 76,5 GHz. Für eine Messung wird bei konstanter Amplitude und kontinuierlicher Emission die Frequenz in einem Bereich von 30 MHz bis 300 MHz mit ca. 80 kHz sägezahnförmig moduliert (FMCW) [139]. Zur Abstandsberechnung wird das reflektierte Signal mit dem ausgesandten Signal gemixt; die Beat-Frequenz ist proportional zur Distanz. Zusätzlich kann über die Frequenzverschiebung durch den Doppler-Effekt bei relativer, lateraler Bewegung die Geschwindigkeit von Objekten bestimmt werden. Eine genauere Beschreibung der Abstandsbestimmung findet sich im Kapitel zu FMCW bei LiDAR-Systemen in Kapitel 3.1.2.

Als Abstandssensor finden sich Radar-Sensoren sowohl für den Nah-, als auch für den Fernbereich bis ca. 200 m (siehe Abbildung 2.1) [66]. Langstrecken-Radare für ACC arbeiten dabei meist bei ca. 76 GHz, weisen eine gute Auflösung von ca. 3° bei einem FoV von etwa $120^\circ \times 30^\circ$ auf [134]. Im Bereich um das Fahrzeug herum wird verstärkt das Frequenzband bei ca. 24 GHz verwendet, was zu Systemen mit größeren FoVs und schlechterer Auflösung führt. Diese eignen sich für Parkassistenten und die Totwinkelüberwachung mit einer minimalen Anzahl von notwendigen Sensoren. Verbaute Modelle erreichen horizontalen FoVs von ca. 100° bis 150° [59].

Die aktuelle Entwicklung konzentriert sich auf die Verkleinerung und Implementierung solcher Module, damit diese noch kostengünstiger werden. Insbesondere die siliziumbasierte CMOS-Technologie für Millimeter-Radar wird in diesem Zusammenhang immer bedeutender [98].

2.2.2.4 LiDAR

LiDARs gehören zu der modernsten Sensortechnologie in Fahrzeugen. Anstelle von Radiowellen, wie sie beim Radar verwendet werden, nutzen LiDARs optische Strahlung in Form von Lasern für die Abstandsbestimmung. Die kürzeren Wellenlängen im Nanometerbereich (905 nm, 1550 nm) ermöglichen höhere Auflösungen und Genauigkeiten, welche insbesondere für mittlere und weit entfernte Objekte relevant sind.

Im Gegensatz zu Radaren muss die Laserstrahlung in LiDARen zusätzlich durch eine Form des Scannens im Raum abgelenkt werden, um nicht nur einen Punkt, sondern einen Raumwinkel abdecken zu können. Neben rotierenden Ansätzen, die 360° abtasten, wurden seit der zweiten DARPA-Challenge 2005 [130] eine Vielzahl von unterschiedlichen 3D-LiDARen von verschiedensten Herstellern entwickelt. Eine Übersicht und detaillierte Betrachtung des Sensorkonzepts findet sich im Kapitel 3.

2.3 Prognose zur zukünftigen Entwicklung

Eine zeitliche Einschätzung von Experten aus dem Jahr 2021 findet sich in [52] („Exhibit 1“). Dieser Einschätzung nach werden die ersten Fahrzeuge mit Level 4 Systemen etwa 2024 erwartet. Insbesondere die langsamen Szenarien des Einparkens sind hier gezeigt. Außerdem beschreibt die Befragung, dass autonomes Fahren auf Autobahnen mittels „L4 Highway Pilot“ im Schnitt 2025 möglich sein soll. Autonomie in städtischen Bereichen wird frühestens 2026 mit Entwicklungsspannen bis 2029 erreicht. Die Funktionen für LKWs sind verzögert: Autobahnen werden in 2027 und vollständige Transporte werden in 2031 erreicht. [52] („Exhibit 1“)

Wie diese Ziele konkret erreicht werden können, beschreibt Winner in [139] (S. 1575 ff.). Demnach entwickelt sich das autonome Fahren aus drei Punkten: „Simple Scenarios“, „High Risk“ und „Low Speed“. Bei „Simple Scenarios“ wird sich demnach zunächst auf Autobahnen bzw. „Highways“ fokussiert. ACC wird dazu stetig verbessert, um schließlich die volle Fahrtüchtigkeit bei hohen Geschwindigkeiten zu erfüllen. Alle Funktionen, die mit dem Bremsen zu tun haben (CAS), sind unter „High Risk“ kategorisiert. Die letzte Rubrik wird als „Low Speed“ bezeichnet und deckt die Entwicklung vom Parkassistenten bis hin zum Valet-Parken ab. Die Verbesserung aller drei Pfade ermöglicht letztlich autonomes Fahren, indem sie so auch angrenzende Funktionalitäten, wie z. B. die Navigation in der Stadt („High Risk“ und „Low Speed“) erschließt.

Abgesehen von der Verbesserung und der Weiterentwicklung der schon bestehenden Systeme gibt es viele angrenzende Forschungsgebiete, die noch genauer untersucht werden müssen. Nach [139] (S. 1578 ff.) beinhalten diese unter anderem die Individualisierung und damit die Anpassung der ADAS-Funktionen an spezielle Altersgruppen, Fahrzeugtypen, Benutzerschnittstellen und die geografische Lage. Ein zweiter Aspekt ist demnach der notwendige Fortschritt in der maschinellen Wahrnehmung und Verarbeitung durch verbesserte Sensorik und Software-Algorithmen. Insbesondere LiDAR-Systeme gelten dabei als kritische Komponenten [52]. Fahrzeuge und Funktionen müssen umfassend, durch neuartige und weitreichende Testszenarien, geprüft und zertifiziert werden. Nur dann dürfen diese für die Straße zugelassen werden. Die Konnektivität, insbesondere zueinander und zur Umgebung, muss optimiert werden. Letztlich sind auch soziale Aspekte zu berücksichtigen. [139] (S.

1578 ff.)

Kapitel 3

Die LiDAR-Technologie

In diesem Kapitel sollen alle relevanten Hintergründe zu LiDAR-Systemen aufgezeigt werden. Im ersten Schritt wird deshalb die generelle Funktionsweise erläutert und speziell veranschaulicht, wie moderne 3D-LiDAR-Sensoren konzipiert sind. Dabei wird sowohl auf die Reichweitenbestimmung als auch auf das Abtasten eingegangen. Im zweiten Schritt werden die wichtigsten Leistungsparameter - Reichweite, Bildrate, Sichtweite und Auflösung - von LiDAR-Sensoren diskutiert. Letztlich werden aktuelle LiDAR-Sensoren beschrieben, kategorisiert und verglichen, um den Stand der Technik aufzuzeigen.

3.1 Funktionsweise von LiDAR-Sensoren

Obwohl LiDAR-Sensoren erst kürzlich neues Interesse geweckt haben [110], ist die grundlegende Technologie schon alt. Der letzte Entwicklungsschritt beinhaltet das Abtasten des Umfelds (Scanning), welches aus einer Einzelpunktmessung eine Punktwolkenmessung macht.

Dieses Kapitel zeigt die Entwicklung von LiDAR-Sensoren und beschreibt die Kernkonzepte der Abstandsmessung und des Scannings.

3.1.1 Übersicht zu LiDAR-Sensoren

Dieser Abschnitt dient als Einleitung und Platzierung von LiDAR-Sensoren generell und beschreibt deren Entwicklung. Insbesondere deren Rolle für das autonome Fahren wird erläutert.

Einführung

Das Akronym LiDAR steht für „Light Detection and Ranging“ und ist das Pendant zu

Radar (von Radio Detection and Ranging) im optischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums. LiDAR-Systeme ermöglichen somit die Abstandsmessung mithilfe von Laserstrahlung.

Unabhängig vom genauen Konzept, erzeugt ein Laser dazu Strahlung, welche an einem Objekt gestreut und durch einen lichtempfindlichen Detektor aufgenommen wird (siehe Kapitel 3.1.2). Durch eine gezielte Datenverarbeitung kann aus dem Sendesignal und dem Empfangssignal schließlich ein Abstand ermittelt werden. In allen Konzepten wird dafür die konstante Geschwindigkeit des Lichts ausgenutzt.

Verbreitung von LiDAR-Sensorik

Getrieben durch die Entwicklung des ersten funktionierenden Lasers 1960 [35] (S. V), fanden sich LiDARs zunächst im militärischen Bereich in Form von Entfernungsmessern („Rangefinder“) und lasergelenkten Bomben [78] (S. 30). Weitere frühe Forschungen durch die NASA ermöglichten die LiDAR-basierte Vermessung der Topologie der Mondoberfläche [114]. Damit verwandt ist Airborne Laserscanning zur Flugobjekt-gestützten Erkundung der Oberfläche zur Generierung von Höhenkarten [75]. Ein weiteres erschlossenes Anwendungsgebiet umfasst z. B. die Vermessung von Ozon in der Atmosphäre [30] (S. 352 f.) Heutzutage finden sich eindimensionale Rangefinder, insbesondere im kommerziellen Markt, zur Vermessung von Räumen. Abstandsmesser, wie sie z. B. von Bosch gebaut werden, sind klein, kostengünstig und robust [101]. Dreidimensionale LiDAR-Systeme sind fester Bestandteil aus dem Spitzensegment moderner Tablets und Smartphones und werden unter anderem für Augmented-Reality (AR) und optimierter Kamerafokussierung verwendet [4, 90].

LiDAR für autonomes Fahren

Aufgrund der Möglichkeit, das Umfeld systematisch zu erfassen, sind LiDAR-Systeme auch für die Automobilindustrie relevant. Einer der relevanten Meilensteine für die Verwendung von LiDAR-Sensoren für das autonome Fahren sind die DARPA Grand Challenges [126]. Diese wurden von der DARPA („Defense Advance Research Projects Agency“) des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums abgehalten. Bei insgesamt drei Veranstaltungen traten von 2004 bis 2007 Forschungsgruppen an, um deren autonome Fahrzeuge vorzuführen.

David Hall, der bereits 2004 an der ersten Grand Challenge mitwirkte [97], konnte 2005 für die zweite Herausforderung einen neuartigen LiDAR-Prototyp auf dem Dach eines Testfahrzeugs installieren [130]. Obwohl jenes Testfahrzeug die Teststrecke nicht beenden konnte, wurde der neue Sensor auf dem Dach in der dritten Herausforderung 2007 von den ersten drei Forschungsgruppen verwendet und markierte damit einen neuen Standard [74]. Dieser Sensor war die erste Version des Velodyne HDL-64E, welcher unter anderem

auch die 3D-Erfassung (Mapping) erlaubt [110]. Die Testfahrzeuge des ersten und zweiten Platzes aus der dritten Herausforderung sind in [93, 126] genauer beschrieben.

Das erstplatzierte Team „Tartan Racing“ mit dem Fahrzeug „Boss“ verwendete bei der DARPA Urban Challenge 2007 insgesamt elf LiDAR-Sensoren: einen Velodyne HDL-64 für das nahe Umfeld, sechs 2D-Scanner der Firma SICK (LMS 291-S05/S14) für das unmittelbare Umfeld, zwei verstellbare Continental ISF 172 auf dem Dach für weit entfernte Objekte und zwei IBEO Alasca XT an der vorderen Stoßstange [125]. Das zweitplatzierte Team „Stanford Racing“ nutzte in deren Fahrzeug „Junior“ neben dem Velodyne HDL-64E ebenfalls ähnliche Sensoren der Firma Sick und IBEO [93]. Im Vergleich zu den anderen LiDAR-Sensoren bietet der Velodyne HDL-64E als einziger Sensor eine echte, dreidimensionale Abtastung mit horizontalem und vertikalem Sichtfeld.

3.1.2 Konzepte zur Abstandsmessung

Die Kernfunktion eines jeden LiDARs ist die Abstandsmessung. Unabhängig vom verwendeten Gerät emittiert jeder Sensor Licht und detektiert den zurückgestreuten Anteil im Anschluss. Abhängig von der Messgröße kann so mithilfe von Laserstrahlung auf die Distanz geschlossen werden. Drei Methoden haben sich etabliert: die Flugzeitbestimmung, die Frequenz- und Amplitudenmodulation. Alle Verfahren werden in diesem Kapitel detailliert erklärt.

3.1.2.1 Flugzeitbestimmung (Time of Flight)

Eine Möglichkeit für die Distanzbestimmung beruht auf der Laufzeit eines Laserpulses. Für die Applikation wird ein kurzer Laserpuls ausgesandt und der Startzeitpunkt vermerkt. An einem bestrahlten Objekt wird das Licht gestreut und gelangt zurück zum Gerät, wo ein lichtempfindlicher Sensor das Signal aufnimmt und die zeitliche Ankunft registriert wird (Abbildung 3.1). Aus der Laufzeit und der bekannten Geschwindigkeit des Lichts im Medium lässt sich so die Distanz nach Gleichung 3.1 bestimmen. Die Methodik wird Flugzeitbestimmung (engl. Time-of-flight, tof) genannt.

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (3.1)$$

Nach Gleichung 3.1 errechnet sich die Distanz zwischen dem LiDAR und dem bestrahlten Objekt d aus der Lichtgeschwindigkeit im Medium c (für Luft $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$) und der Laufzeit Δt .

Die Bestimmung funktioniert umso besser, je steiler die Flanken des Laserpulses sind: Hohe Spitzenleistungen mit kurzen Pulsdauern sind deshalb zu bevorzugen. Als Laserquelle werden aus diesem Grund oftmals Laserdioden oder Dioden-gepumpte Solid-State-Laser

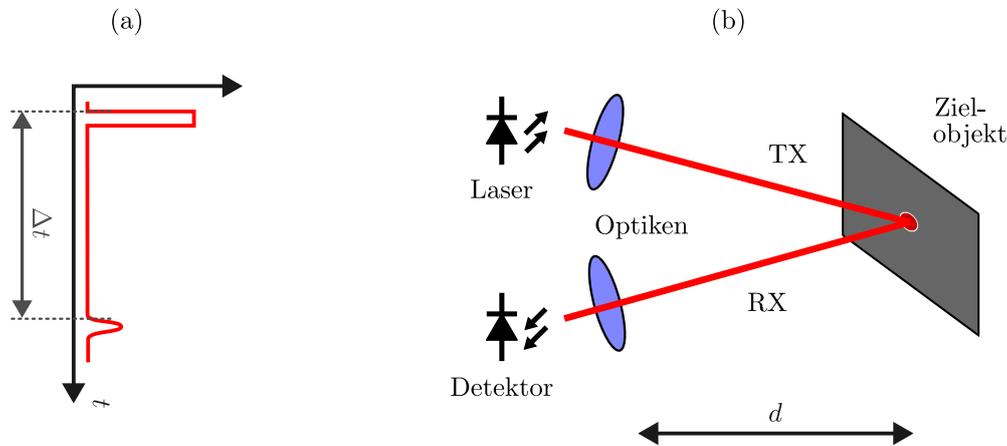


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des „Time-of-Flight“-Prinzips: (a) Signalverlauf und (b) Anordnung (basierend auf [108], S. 3).

verwendet [78] (S. 18 f.). Detektiert wird das zurückgestreute Licht, z. B. durch Avalanche-Photodioden (APD) [78] (S. 19).

3.1.2.2 Amplitudenmodulation

Im Gegensatz zur gepulsten Laserstrahlung kann zur Abstandsmessung auch kontinuierliche Strahlung verwendet werden. Verwandt zum ToF ist dabei die Amplitudenmodulation: AMCW („Amplitude Modulated Continuous Wave“). Diese Art von Sensor wird häufig auch als ToF-Kamera bezeichnet, welche ihren Ursprung 1977 [86] hat. Wie [51] beschreibt, erfolgte der Durchbruch der Technologie durch die sogenannte lock-in-CCD-Technik [116], welche schnelle Abtastraten ermöglichte und 1999 den ersten Prototypen des Sensors hervorbrachte [71]. Das Funktionsprinzip von AMCW ist schematisch vereinfacht in Abbildung 3.2 gezeigt.

Kern des Konzepts ist die sinusförmige Modulation der Amplitude der kontinuierlichen Strahlung mit einer Frequenz im Bereich von einigen 10 MHz [105]. Das von einem Objekt gestreute Licht wird mit einem CCD-Detektor aufgenommen und mit dem Modulationssignal verglichen, um daraus die Phase zwischen den beiden Signalen zu bestimmen. Bei dieser Art der Distanzbestimmung ist die Phase direkt proportional zur Distanz, wie aus Gleichung 3.2 hervorgeht. Durch die Feststellung des Phasenunterschieds kann so die Objektdistanz berechnet werden [50].

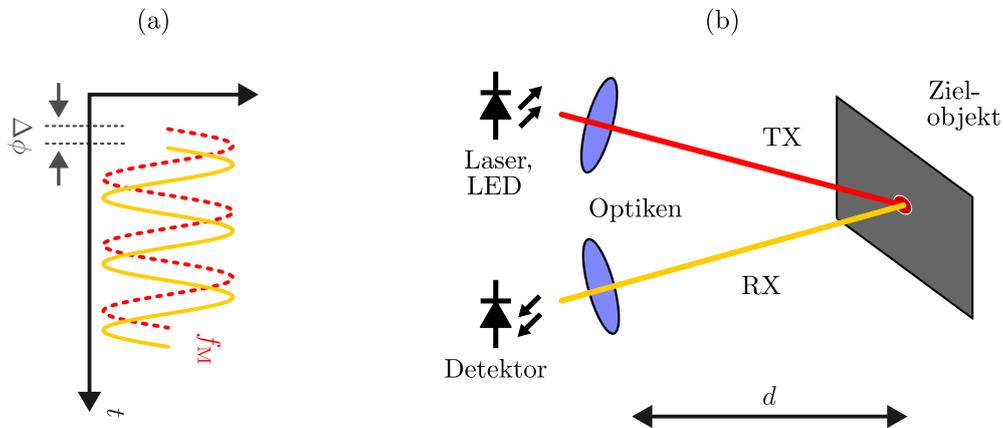


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des AMCW-Prinzips für die Distanzbestimmung: (a) Signalverlauf und (b) Anordnung (basierend auf [108], S. 4).

$$d = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta\phi}{2\pi f_M} \quad (3.2)$$

Die Distanz d bestimmt sich somit aus der Lichtgeschwindigkeit im Medium c , dem Phasenunterschied $\Delta\phi$ und der Modulationsfrequenz f_M . Ein Beispiel hierfür ist das Photonic-Mixer-Device aus [100].

3.1.2.3 Frequenzmodulation

FMCW ist der dritte Ansatz zur Distanzbestimmung. Im Unterschied zu AMCW wird bei dieser Methode nicht die Amplitude, sondern die optische Frequenz eines kohärenten Lasers moduliert („Chirp“). In der einfachsten Form handelt es sich dabei um eine lineare (rampenartige) Frequenzänderung: Eine komplexere Variante ist die dreiecksförmige Modulation, wie sie z. B. in [64] untersucht wird. Das optische Signal des Lasers und das reflektierte Signal werden vor dem Detektor optisch überlagert. Durch eine FFT des Detektorsignals lässt sich die Beat-Frequenz bestimmen, welche der konstanter Frequenzunterschied zwischen dem reflektierten Signal und dem Originalsignal ist. Die Beat-Frequenz ist nach Gleichung 3.3 direkt proportional zur Distanz des Objekts. Abbildung 3.3 zeigt das Prinzip schematisch [105].

$$d = f_r \cdot \frac{cT}{2B} \quad (3.3)$$

Die Distanz d errechnet sich aus dem konstanten Frequenzunterschied f_r , der Lichtgeschwindigkeit im Medium c , der Chirp-Dauer T und der Frequenzbandbreite des Chirps B .

Bei Verwendung einer dreiecksförmigen Modulation kann aus den zwei Beat-Frequenzen während der unterschiedlichen Chirp-Richtungen ebenfalls die Geschwindigkeitskomponente des Objekts in Richtung des Sensors berechnet werden.

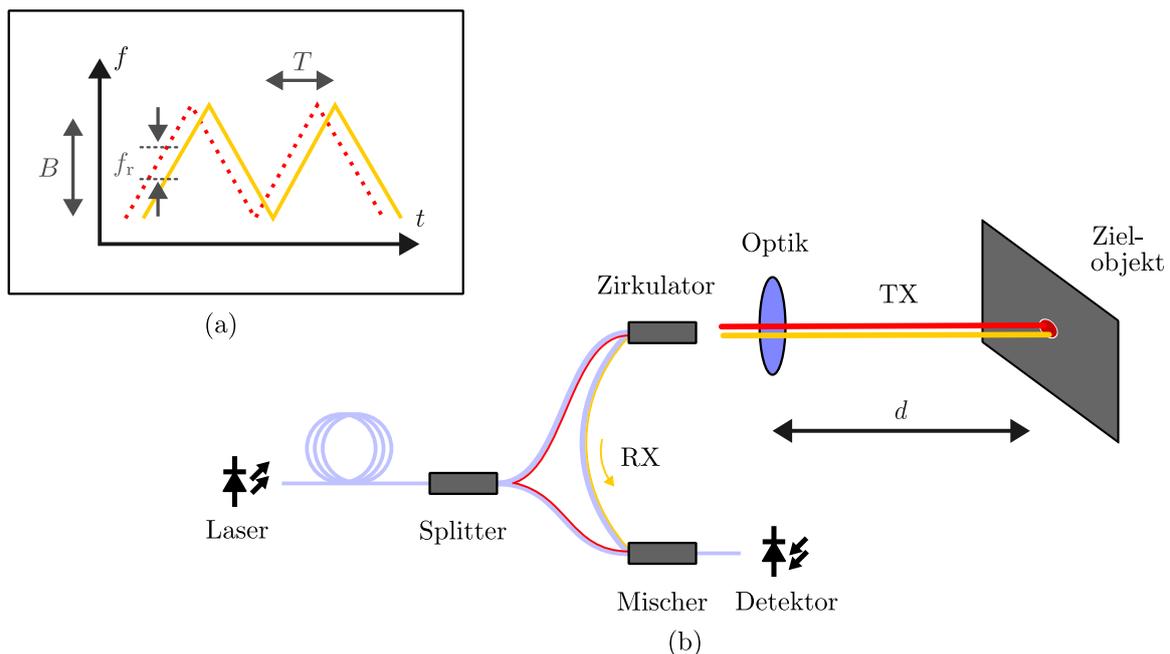


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des FMCW-Prinzips für die Distanzbestimmung: (a) Signalverlauf basierend auf [108], S. 4) und (b) Anordnung (basierend auf [16], S. 1).

3.1.3 Konzepte zur 3D-Abtastung

Die zweite Besonderheit moderner LiDAR-Systeme ist die Abtastung eines gegebenen Sichtfelds. Dabei soll die Technologie betrachtet werden, unabhängig davon, ob dabei der Sendepfad und der Empfangspfad separat oder gemeinsam abgelenkt wird. Dieses Kapitel beschreibt, wie Optiken, Spiegel und Mikro-Elektromechanische-Systeme (MEMS) aufgebaut sind und wie sie verwendet werden.

3.1.3.1 Mechanische 3D-Abtastung

Ein Ansatz zur 3D-Abtastung ist die Bewegung der Laserquelle bzw. des Detektors selbst. Oftmals werden so beide Pfade kontinuierlich rotiert, was die Abtastung einer Linie in

360° um das Gerät erlaubt. Ansätze dieser Art finden sich z. B. bei Produkten der Firmen Velodyne oder Ouster (Tabelle 1 in [104]).

Neben der einfachen mechanischen Rotation werden häufig optische Elemente wie Prismen oder Spiegeln verwendet. Das optische Element wird dabei entweder kontinuierlich gedreht oder schwingt in Resonanz. Abbildung 3.4 zeigt eine Übersicht häufig verwendeter Prinzipien des mechanischen Scannens.

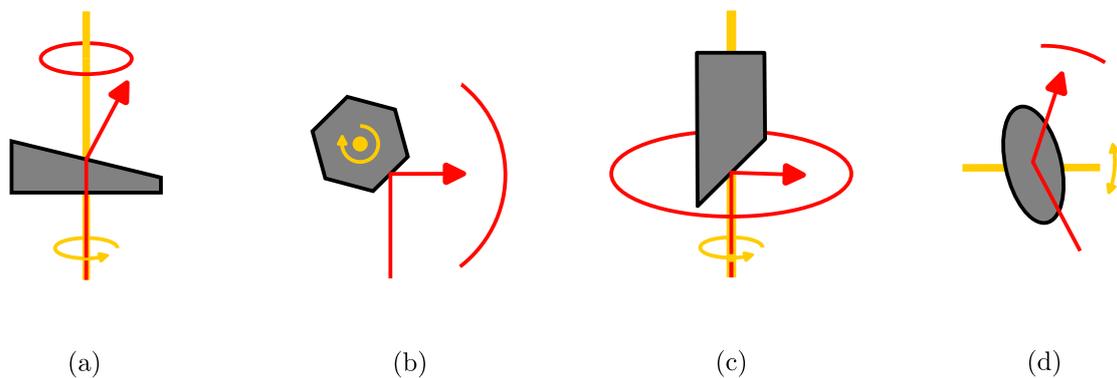


Abbildung 3.4: Vier verschiedene Konzepte des mechanischen Scannens in LiDAR-Sensoren: (a) Keilprismen, (b) Polygonscanner, (c) Galvanometer, (d) Spiegel (basiert auf: Abbildung 1.4 von [89] S. 11).

Das mit (a) gezeichnete Schaubild zeigt ein rotierendes Keilprisma. Je größer der sogenannte Keilwinkel zwischen den optischen Flächen eines Elements ist, desto stärker ist die Ablenkung. Die Projektionsfigur auf einer orthogonalen Fläche zur optischen Achse beschreibt einen Kreis. Dieses Konzept wird z. B. von dem LiDAR-Hersteller Livox genutzt [15].

Ein Polygonscanner (b) ist, mathematisch gesehen, ein rotierendes, reguläres Prisma mit reflektierenden Mantelflächen ([76] Kapitel 4). Beim Scannen wird der Sendepfad gemäß dem Reflexionsgesetz an Spiegelflächen kontinuierlich abgelenkt, bis die Kante einer Mantelfläche erreicht wird. Ist diese überschritten, ist der Ablenkwinkel wieder identisch zur Startposition. Für einen Polygonscanner mit sechs Mantelflächen wird in einer Umdrehung somit die selbe Linie sechs mal abgetastet.

Ein weiteres Verfahren, welches ebenfalls eine Linien auf einer Projektionsebene erzeugt, ist in (c) dargestellt. Hier wird ein unter 45° stehender Spiegel rotiert. Die Ablenkung ist aperturerhaltend, da das einfallende Licht entlang der Rotationsachse verläuft und somit zur Normalen der Oberfläche immer einen Winkel von 45° aufweist. Der Sendepfad wird auf einer Kreisbahn in einer Ebene um die Rotationsachse herum reflektiert.

Eine letzte Art der mechanischen Ablenkung ist die Nutzung elektromagnetischer Motoren zur Anregung von oszillierenden Spiegeln (d). Diese Art von Scanner wird als Galvanometer bezeichnet ([76] Kapitel 9). Die Ablenkung beruht im Gegensatz zu den anderen Methoden nicht auf einer Rotation, sondern auf einer Oszillation. Ein Scanner schwingt dabei meist sinus-förmig mit fester Amplitude. Die Projektionsfigur eines solchen Scanners beschreibt demnach ebenfalls Linien, welche im Wechsel die Richtung ändern. Die Verwendung zweier Galvanometerscanner werden oftmals in 2D-Ablenkungen ([76] Kapitel 8.3.2.3) für z. B. Lasergravuren verwendet, wie dieses mathematische Modell zeigt [22].

Bei scannenden Systemen mit aktiv schwingenden Komponenten wird oft ein koaxiales bzw. monostatische LiDAR-Design verwendet. Dies bedeutet, dass das ausgesandte und empfangene Licht überlagert ist und annähernd den selben Pfad besitzt. Das Gegenteil dazu wäre ein bistatisches System, bei dem der Sende- und Empfängerpfad getrennt sind [78] (S. 17). Der Sende- und der Empfangspfad werden dann zumeist gemeinsam abgetastet, was sicherstellt, dass nur Photonen aus der bestrahlten Richtung empfangen werden.

3.1.3.2 Quasi Solid-State-Scanning mittels MEMS

Eine der neuesten Ansätze zur Realisierung von verschleißfreien Lösungen beruhen auf Mikro-Elektromechanischen-Systemen (MEMS). Durch die Strukturierung von Halbleitermaterialien können optische Spiegel und mechanische Aufhängungen, wie Federn, hochintegriert, in großer Stückzahl hergestellt werden. Die Kernkomponente eines MEMS-LiDAR-Scanners ist der optisch Spiegel, dessen Durchmesser zumeist wenige Millimeter beträgt. Die zweite essentielle Komponente ist der Antrieb: Hier finden sich neben elektrostatischen, elektro-magnetischen und piezo-elektrischen Antrieben [56] heutzutage auch elektrothermische Aktuatoren [136]. MEMS-Scanner oszillieren sowohl eindimensional als auch zweidimensional. Dabei werden sie in resonante und nicht resonante Schwinger unterteilt [136].

Eine Beispiel hierfür ist der MEMS-Scanner der Firma Blickfeld, welcher in Abbildung 3.5 gezeigt wird. Im Vergleich zu der in Tabelle 2 gezeigten Übersicht in [136], zeichnen sich diese durch eine verhältnismäßig große Apertur mit einem Durchmesser von mehr als 10 mm aus und ermöglichen zugleich Scanwinkel von $100^\circ \times 30^\circ$ [91]. Eine Kombination aus zwei MEMS-Ablenkungseinheiten wird im monostatischen Cube1 der Firma Blickfeld GmbH eingesetzt.

3.1.3.3 3D-Abtastung durch optische Elemente

Ein anderer Ansatz verschleißfreier Abtasteinheiten wird oftmals durch fixierte optische Linsen erreicht. Dazu werden z. B. die Laserquellen in Form eines Arrays hinter einer Linse positioniert. Durch die unterschiedlichen lateralen Abstände zur optischen Achse der Linse

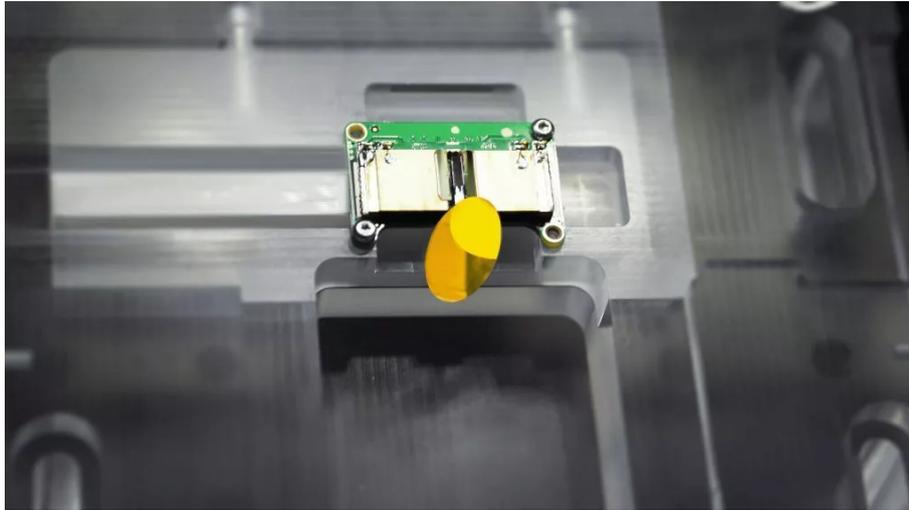


Abbildung 3.5: Blickfeld MEMS-Strahlableitungseinheit [92].

wird das Licht in andere Raumwinkel abgelenkt. Wird das gesamte Sichtfeld zeitgleich ausgeleuchtet, wird oftmals von Flash-LiDARs gesprochen. Für den Detektionspfad wird hierbei das gleiche Konzept verwendet. Jeder Pixel des Sensors kann somit ein einzelner Empfangspfad sein, welcher einen diskreten Raumwinkel betrachtet. Abbildung 3.6 zeigt das Konzept eines Flash-LiDARs.

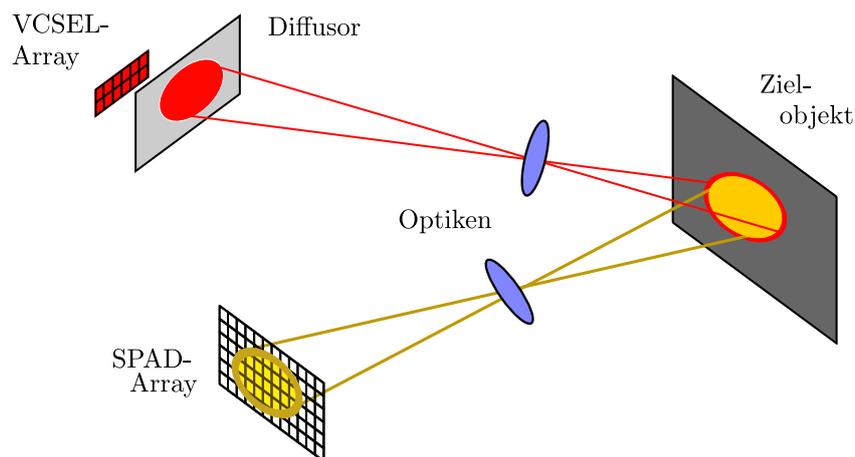


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung eines Flash-LiDARs (basierend auf [142]).

Alternativ zu mehreren Quellen kann eine einzelne Quelle auch lateral zur Linse bewegt werden. Ein Beispiel für ein solches Konzept ist in [23] gezeigt. Choi et al. verwendet

darin eine Relay-Optik und eine Fisheye-Linsengruppe, um eine gute Kollimation über das gesamte FoV von ca. 160° zu erreichen.

3.1.3.4 Solid-State 3D-Abtastung

Da Scanning-Mechanismen ohne bewegliche Bauteile ein geringeres Ausfallrisiko besitzen, sind sogenannte „solid-state“ LiDAR-Systeme für den Automobilmarkt sehr interessant. Drei „solid-state“ Scanning-Konzepte werden nachfolgend zusammengefasst.

Eine Methode, die gänzlich ohne bewegliche Baugruppen auskommt, nutzt die Modulation der Wellenlänge bzw. der optischen Frequenz von Licht für das Scannen aus. Durch die Modulation der Wellenlänge des Lasers kann so durch die Dispersion an einem optischen Prisma oder durch Beugung an einem optischen Gitter ein anderer Ablenkwinkel eingestellt werden. Ein Beispiel für ein solches System ist in [147] gezeigt. Eine weitere Methode der 3D-Abtastung beruht auf optischen Antennen, die gezielt zur Interferenz gebracht werden, um im Fernfeld bestimmte Ablenkung zu erreichen. Diese Technologie nennt sich „Optical Phased Array“ (OPA) [20]. Eine letzte Methode, die in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen hat, wurde durch das Startup Lumotive getrieben. Mittels sogenannter „Light Control Metasurface“ (LCM) lassen sich einfallende Laserstrahlen ohne bewegliche Teile ablenken [32].

3.2 Charakterisierung von LiDAR-Systemen

Unabhängig von der Ausprägung der 3D-Abtastung und der Abstandsmessung lassen sich nahezu alle LiDAR-Systeme anhand der Leistungsparameter vergleichen. Diese Größen sind essentiell, um beurteilen zu können, ob ein beliebiger Sensor für einen bestimmten Einsatzbereich geeignet ist. Obwohl LiDAR-Sensoren viele verschiedene relevante Merkmale aufweisen können, lässt sich die zentrale Leistung durch vier Parameter beschreiben: Reichweite, Bildrate, Sichtbereich und Auflösung. Dieser Abschnitt geht auf diese Größen ein.

3.2.1 Reichweite (Range)

Die bedeutendste Kenngröße eines jeden LiDARs - egal für welchen Einsatzbereich - ist die Reichweite (Englisch: Range). Die Reichweite wird im weiteren Verlauf des Dokuments auch als Range bezeichnet, da dies der gängige Terminus ist. Ganz allgemein, gibt die Range an, in welchem Distanzbereich der Sensor Entfernungen messen kann. Unglücklicherweise ist diese Kennzahl durch die Industrie stark verallgemeinert worden, so dass verschiedene Messdefinition dafür verwendet werden. Entscheidend für das Verständnis

der Range eines beliebigen Sensors sind immer das Zielobjekt (Target) und die generellen Umgebungsbedingungen.

Diese Kapitel beschreibt den theoretischen Hintergrund, die limitierende Faktoren, sowie die Detektionsratenbestimmung. Dabei wird sich insbesondere auf die Bestimmung mittels tof konzentriert.

3.2.1.1 Mathematisches Modell

Mathematisch ergibt sie die mögliche Reichweite eines gepulsten Lasers für lambertsche Zielobjekte nach Koechner [67] über die detektierte Signalleistung (3.4).

$$P_s = \frac{P_0 \cdot A_r \cdot \rho \cdot T_r \cdot T_t \cdot \exp(-2\sigma R)}{\pi \cdot R^2}. \quad (3.4)$$

Hierbei ist P_0 die Leistung des Lasers, A_r die Apertur der Detektionsoptik, ρ die Reflektivität des Zielobjekts (Targets), T_t und T_r die jeweiligen optischen Transmissionen der Sende- und Empfangspfade, R die Reichweite und σ der atmosphärische Absorptionskoeffizient. Ob ein Objekt in einer gewissen Entfernung noch detektierbar ist, hängt zusätzlich von der Art und Elektronik des Detektors ab. Häufig werden dazu Photodioden, wie Avalanche-Photodioden (APDs), Silizium Photomultiplier (SiPM) oder Einzelphoton-Avalanche-Diode (SPADs) verwendet. Elektrische Modelle für das Rauschverhalten gehen in die Detektion mit ein und limitieren die Distanz weiter [151, 60, 87].

Aus Gleichung 3.4 geht hervor, dass die empfangene Leistung mit dem Quadrat der Entfernung R abfällt. Demnach können von Objekten aus der doppelten Entfernung nur ein viertel der Photonen detektiert werden. Ein zweiter relevanter Zusammenhang aus Gleichung 3.4 ist die Proportionalität zur Fläche der Detektionsoptik A_r . Verdoppelt sich diese Apertur, so verdoppelt sich auch die messbare optische Leistung. Die Reichweite von LiDARen wird in Form von Detektionswahrscheinlichkeiten angegeben. Diese beschreiben wie hoch die Wahrscheinlichkeit einer Erfassung eines Pixel-großen Targets mit definierter Reflektivität bei einer bestimmten Beleuchtungsstärke ist. Ein Pixel steht dabei für die minimale Auflösung des LiDARs, welche meist durch die Kollimierung des Lasers definiert ist. Je geringer die Reflektivität des Targets oder je höher das Rauschen, z. B. bedingt durch die umgebende Beleuchtung, desto früher fällt die Detektionswahrscheinlichkeit [46]. Die Reflektivität des Targets, welche hier mit ρ bezeichnet wird, ist für die detaillierte Betrachtung, abseits von Lambertschen Strahlern, keine Konstante. Für reale Szenarien und Materialien ist ρ eine Funktion - die sogenannten bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF). Abhängig von der Wellenlänge des Lasers λ , dem Einfallswinkel des Lasers in beiden Achsen θ_i, ϕ_i und der Orientierung des Targets zum Detektor in zwei Achsen θ_r, ϕ_r werden unterschiedliche Leistungen gemessen: $f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ [83].

3.2.1.2 Limitierende Faktoren

Wie bereits Gleichung 3.4 zeigt, hängt die detektierte Leistung von vielen Faktoren ab. Selbst wenn die Detektionsraten-Kurve bekannt ist, beschreibt dies nicht das gesamte System.

Angaben bezüglich der Reichweite bei bestimmten Reflektivitäten, wie 10 %, beziehen sich zumeist auf Lambertsche Strahler mit senkrechter Ausrichtung. Objekte in realen Szenarien sind nicht plan und deren Abstrahleigenschaften sind in den wenigsten Fällen lambertsch. Fahrzeuge mit schwarzer Lackierung, die unter einem Winkel zu dem Gerät stehen, wären demnach deutlich schlechter zu detektieren. Hier ist deshalb die BRDF zu berücksichtigen. Ein aktuelles Beispiel für die Komplexität eines vereinheitlichten BRDF-Modells findet sich in [117].

Ein zweiter Aspekt ist der des Pixel-füllenden Targets. In der Realität und insbesondere für kleine Objekte in großen Entfernungen gibt es viele partielle Treffer auf dem Target. Neben der reduzierten Leistung kommt es auch zu unerwarteten Streuungen an, z. B. Kanten. Umgebungsbeleuchtung senkt das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und verringert somit die Reichweite [46]. Speziell auf den Laser ausgelegte spektrale Bandpassfilter können mit Raumfiltern kombiniert werden, um diesen Einfluss weiter zu senken [82].

Umgebungsbedingungen, wie Regen oder Nebel, führen zu zusätzlichen Streuzentren in der Luft, welche die optische Leistung reduzieren. Die Abschwächung hängt insbesondere von der Dichte des Nebels bzw. der Rate des Niederschlags [47] ab.

Ein weiterer Aspekt ist die zulässige, erlaubte Laserleistung. Da LiDAR im Umfeld von Menschen verwendet werden, müssen diese eine Laserklasse 1 nach IEC 60825-1 [62] besitzen. Diese Norm definiert, wie hoch die zulässigen Laserpulsenergien bzw. Laserleistungen sein können, damit am menschliches Auge bei Exposition kein dauerhafter Schaden entsteht. Da die Laserleistung nach Gleichung 3.4 linear proportional zur messbaren Leistung ist, limitiert diese Norm die maximale Reichweite. Ein Grund für das starke Interesse in Sensoren mit einer Wellenlänge von 1550 nm ist die Tatsache, dass die Norm eine deutlich höhere Leistung als bei vergleichbaren Diodenlasern bei 905 nm zulässt. Dies liegt insbesondere daran, dass Strahlung bei Wellenlängen von 1550 nm bereits in der Hornhaut absorbiert wird und nicht, wie bei 905 nm, zur Retina vordringen kann.

3.2.1.3 Detektionsraten basierend auf binärer Klassifizierung

In diesem Kapitel wird auf die mathematischen Grundlagen der Detektionsraten eingegangen und beschrieben, wie sich die Wahrscheinlichkeiten mithilfe der Binomialverteilung und für mehrere Pixel bestimmen lassen.

Übersicht zur binären Klassifizierung

Hauptanwendung findet die binäre Klassifizierung in der medizinischen Diagnostik für den Krankheitsbefund [42] (S. 198). Diese Art der Einteilung ist immer dann möglich, wenn ein Ereignis genau zwei Ergebnisse haben kann. Hier bedeutet dies, dass eine Messung eines Objekts entweder eine korrekte Detektion im Toleranzfeld anzeigt oder nicht. Je nachdem, ob ein Objekt bzw. Hindernis vorhanden ist oder nicht und ob die Messung ein richtiges Ergebnis liefert oder nicht, lassen sich vier mögliche Ergebnisse erzielen. Diese sind falsch-positiv (False positiv, FP), richtig-negativ (True negative, TN), richtig-positiv (True positiv, TP) oder falsch-negativ (False negative, FN) [53] (S. 149 ff.). Die nachfolgende Abbildung 3.7 illustriert diese Definitionen anhand von Pixeln ohne und mit einem Hindernis.

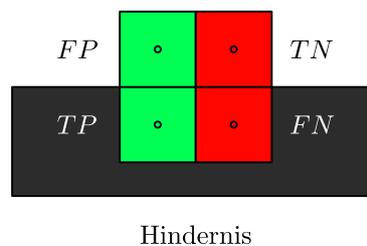


Abbildung 3.7: Mögliche Ergebnisse nach binärer Klassifizierung: Detektion (grün) und keine Detektion (rot).

Richtig-positiv-Rate und Falsch-negativ-Rate

Detektionsraten von $> 90\%$ bedeuten, dass statistisch 90 aus 100 Messungen die richtige Entfernung im Toleranzband ergeben. Diese Rate wird meistens als Richtig-positiv-Rate oder Sensitivität [42] (S. 198 ff.) bezeichnet. Im folgenden wird sie mit TPR (True positive rate) abgekürzt. Hohe Werte nahe $TPR = 1$ sind dabei essenziell, da jedes nicht detektierte Hindernis zu einem Unfall führen kann.

Die Wahrscheinlichkeit mit der - trotz vorhandenem Objekt bzw. Hindernis - nichts detektiert wird, wird als Falsch-negativ-Rate bezeichnet und hier mit FNR (False negative rate) abgekürzt. Sie beschreibt die Rate, bei welcher vorhandene Hindernisse nicht detektiert werden, was katastrophale Folgen haben kann. Diese Rate muss möglichst klein sein und gegen Null gehen. Allgemein gilt der Zusammenhang: $TPR + FNR = 1$.

Richtig-negativ-Rate und Falsch-positiv-Rate

Das Pendant zu den oben beschriebenen Raten bezieht sich auf diejenigen Tests bzw.

Messungen, bei denen in der Realität kein Target vorhanden ist. Die Richtig-negativ-Rate (True negative rate, TNR) beschreibt dann, mit welcher Wahrscheinlichkeit kein Target detektiert wird, wenn auch kein Target vorhanden ist. Dies wird Spezifität genannt [42] (S. 198 ff.).

FPR (False positive rate) wird im folgenden als Abkürzung für die Falsch-positiv-Rate verwendet. Diese gibt an, wie häufig Objekte detektiert werden, die in der Realität nicht existieren. Der Zusammenhang zur Richtig-negativ-Rate lautet: $TNR + FPR = 1$.

Detektionsraten aus Pixelkombination mittels Binomialverteilung

Nachdem 3D-LiDAR-Systeme nicht nur eine Einzelpunkt- bzw. Einzelpixelmessung durchführen, ist bei der Bestimmung der Detektionswahrscheinlichkeit von ausgedehnten Objekten eine Vielzahl von Pixeln zu kombinieren. Bei gleichartigen und unabhängigen Ereignissen mit zwei Ergebnissen - hier: Detektion oder keine Detektion - ist die Binomialverteilung für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit zu verwenden [9] (S. 682). Die Wahrscheinlichkeitsfunktion der Binomialverteilung ist wie folgt in Gleichung 3.5 definiert [9] (S. 682).

$$P(X = k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k} \quad (3.5)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass exakt k Ereignisse aus einer Gesamtheit von n zutreffen, errechnet sich aus dem Binomialkoeffizienten $\binom{n}{k}$ (siehe Gleichung 3.6) und der Einzelwahrscheinlichkeit p . Außerdem gilt: $k = 0; 1; 2; \dots; n$ [9] (S. 64).

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k! \cdot (n - k)!} \quad (3.6)$$

Oftmals ist es nicht relevant, wie häufig ein einzelnes Ereignis für z. B. $k = 2$ auftritt, sondern mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Mindestanzahl von Ereignissen passieren: z. B. $k \leq 2$. Dies lässt sich über die kumulierte Binomialverteilung, auch Verteilungsfunktion [9] (S. 683) genannt, bestimmen. Sie berechnet sich nach Gleichung 3.7 als Summe der Wahrscheinlichkeitsfunktionen für alle Einzelereignisse k in n für die $k \leq x$, wobei x der obere Grenzwert ist [9] (S. 683).

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{k \leq x} P(X = k) \quad (3.7)$$

3.2.2 Bildrate (Framerate)

Der zweite entscheidende Parameter ist die Bildrate. Auch Bildfrequenz, Bildwechselfrequenz oder Framerate genannt, gibt sie an wie oft die Aufnahme einer Szene zeitlich wiederholt wird. Der Begriff Framerate ist der gängige Terminus und wird deshalb ebenfalls verwendet. Frameraten erhältlicher Produkte reichen von 10 Hz bis 30 Hz [104].

Nach dieser Definition ist die Framerate maßgeblich durch die Art des Scannings bestimmt. Je schneller das definierte Sichtfeld abgetastet wird, desto höher ist die Framerate. In vielen LiDAR-Systemen ändert sich deshalb die Framerate, wenn das Sichtfeld oder die Auflösung verändert werden. Die zweite Limitation dieser Leistungsgröße kommt in Form der Datenverarbeitung. Sie muss jede einzelne individuelle Messung direkt oder einen kompletten Frame als ganzes auswerten und speichern können.

3.2.3 Sichtbereich (Field of View)

Dieses Kapitel beschreibt die technische Angabe des Sichtbereichs, wie dieser zu Stande kommt und welche Besonderheiten relevant sind.

3.2.3.1 Bildaufbau

Eine der Kerngrößen eines jeden LiDARs ist der Sichtbereich; oftmals wird dieser Parameter als FoV (engl. Field of View) abgekürzt. Dieser beschreibt den Winkelraum, den das LiDAR abscannt und in dem Entfernungsmessungen durchgeführt werden. Grundsätzlich teilt sich der Sichtbereich in eine vertikale (FoV_v) und eine horizontale Komponente (FoV_h).

In den meisten erhältlichen scannenden LiDAR-Systemen ist das gesamte Bild aus vielen horizontalen Scanlinien (eng. scan lines) aufgebaut, da die Szene oftmals Zeile für Zeile abgetastet wird. Jeder einzelne Punkt (Pixel) einer Scanlinie stellt eine Distanzmessung dar. Der Mittelpunktsabstand zwischen zwei Pixeln wird als horizontale und vertikale Auflösung bezeichnet. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Begrifflichkeiten konzeptionell 3.8.

3.2.3.2 Interessensbereich (Region of Interest)

Wie aus 3.8 hervor geht, weisen manchen LiDAR-Systeme einen Interessensbereich - die sogenannte „region of interest“ (RoI) - auf. In der RoI wird mit erhöhter Auflösung und evtl. auch mit erhöhter Framerate abgetastet, um die Datendichte zu erhöhen. Der Bereich außerhalb der RoI wird unregelmäßig oder mit einer geringeren Auflösung gescannt. Effektiv wird das gesamte FoV demnach in zwei Funktionsbereiche aufgeteilt: in der RoI und außerhalb der RoI. Die Größe und der genaue Unterschied zwischen den beiden Bereichen hängen maßgeblich von dem Einsatzbereich und den sich daraus ergebenden

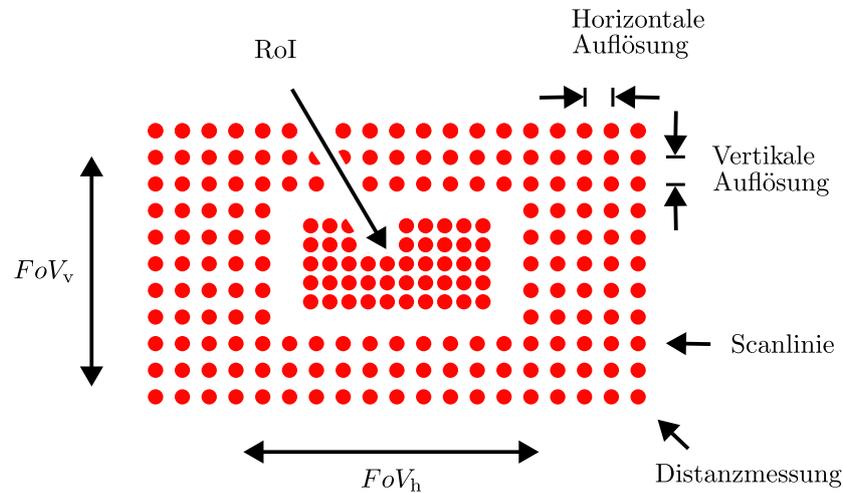


Abbildung 3.8: Bezeichnungen im Sichtbereich.

Anforderungen ab. In Einzelfällen ist die genaue Position des RoI im FoV auch noch adaptierbar, um externe Toleranzen ausgleichen zu können oder um dynamisch bestimmte Bereiche anvisieren zu können.

3.2.3.3 Abdeckung (Coverage)

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der sich aus dem Sichtfeld ergibt, ist die Abdeckung (Coverage). Sie beschreibt, welcher Anteil des gesamten spezifizierten (rechteckigen) FoVs tatsächlich abgetastet wird. Vergleichbar ist die Abdeckung mit dem Füllfaktor von Kamerasensoren, der die lichtempfindliche Fläche im Verhältnis zur gesamten Sensorfläche angibt. Obwohl die Abdeckung eine relevante Kenngröße für die Qualität der Abtastung im FoV ist, hat sie allerdings auch den Nachteil, dass sie eine gemittelte Größe ist und somit lokale Änderungen nicht betrachtet. Eine unregelmäßige Abtastung ist für die Automobilanwendungen zu vermeiden, da hier ein erhöhtes Risiko für Nichtdetektionen besteht. Gewünscht ist eine möglichst hohe Abdeckung mit konstanter Auflösung über das gesamte spezifizierte FoV.

3.2.4 Auflösung (Resolution)

Grundsätzlich beschreibt die Auflösung, wie gut zwei benachbarte Informationen voneinander zu unterscheiden sind. Für 3D-LiDAR-Systeme ist dies besonders für die Abtastung

des Sichtbereichs relevant. Es können dabei eine Messauflösung und eine Scanauflösung unterschieden werden.

3.2.4.1 Messauflösung

Die Messauflösung ist generell unabhängig von der Abtastung selbst. Sie ergibt sich aus der Überlagerung des durch den Laser bestrahlten und von dem Detektor betrachteten Raumwinkels. Im Fernfeld sind die beiden relevanten Größen die Kollimierung des Lasers und das Sichtfeld des Detektionspfads. Ihre Überlagerung kann somit je nach Art der Laserquelle, des Detektors und der Optik verschiedene Ausmaße erreichen. Für eine optimale Ausnutzung der Laserenergie sollten Kollimierung und Detektions-FoV im besten Fall identische Ausmaße haben. Bauteilverfügbarkeiten, Dimensionierungsprobleme, Toleranzen und das Scanning selbst limitieren dies. Die Messauflösung ist vollständig durch die Hardware bestimmt. In Datenblättern und Untersuchungen finden sich oft die Angabe der Kollimierung, um diese Messauflösung zu beschreiben.

3.2.4.2 Scanauflösung

Als Auflösung (Resolution) wird meistens die geometrische Scanauflösung bezeichnet. Auch diese Größe wird in eine horizontale und eine vertikale aufgeteilt. Sie beschreibt den Abstand im Winkelraum, der zwei örtlich benachbarte Messungen trennt. Die Art und die zeitliche Abfolge der Abtastung spielen für diese Bezeichnung keine Rolle. In rotierenden 3D-LiDARen ist die vertikale Auflösung durch den Abstand der Emitter vor der Optik bestimmt. Die horizontale Auflösung ergibt sich aus der Rotationsgeschwindigkeit und der Laser-Repetitionsrate. Für scannende Systeme, die mit zwei Spiegeln oder Prismen arbeiten, wird oft Zeile für Zeile abgetastet. Dies hat zur Folge, dass die horizontale Auflösung nur von der Scangeschwindigkeit des optischen Elements und der Laser-Repetitionsrate abhängt. Die vertikale Auflösung ist dagegen nur von dem Ablenkwinkel des vertikalen optischen Elements abhängig. In manchen Fällen ist diese Größe mittels Software auch im laufenden Betrieb einstellbar [82].

3.3 Einteilung kommerzieller LiDAR-Sensoren

Kommerziell erhältliche 3D-LiDAR-Systeme finden sich aus verschiedenen Kombinationen der Distanzbestimmung und der 3D-Abtastung, wie sie in Kapitel 3.1.2 und 3.1.3 beschreiben wurden. Dieses Kapitel gruppiert kommerziell erhältliche Systeme zunächst nach Technologie und beschreibt anschließend drei vielversprechende Produkte im Detail.

3.3.1 Gruppierung nach Technologie

Eingeleitet durch Velodyne [110] gelten rotierende 3D-LiDAR-Sensoren als Begründer der Technologie. Die Distanzbestimmung erfolgt immer über die Laufzeitbestimmung, gescannt wird durch das Rotieren eines Laser-Detektor-Arrays. Jeder Kanal aus Laser-Detektor-Pfad erzeugt eine Scanlinie in der Punktwolke. Die Technologie basiert auf einer mechanisch gelagerten Rotation. Vorteile dieses Systemdesigns ist das große horizontale FoV von 360° . Nachteilig sind insbesondere die mechanische Lagerung, der Aufwand der Ausrichtung der optischen Pfade während der Produktion, die limitierte und feste vertikale Auflösung und die Größe der leistungsstarken Varianten. Neben den Weiterentwicklungen von Velodyne (z. B. VLP-16) [131] arbeiten auch Firmen, wie Ouster (OS) [143] und Hesai (Pandar) [55] mit ähnlichen rotierenden Konzepten.

Eine besondere Form mechanischer LiDAR-Systeme verwendet Galvanometer-Scanner zur Abtastung. Dieses Konzept wurde z. B. von der Firma Luminar verfolgt [34, 70] und mit einem Faserlaser bei einer Wellenlänge von 1550 nm kombiniert. Diese Systeme können durch ToF und den vergleichbar hohen Pulsenergien große Reichweiten erzielen. Nachteile der Technologie sind insbesondere deren Größe, Gewicht, Preis und der hohe Leistungsverbrauch. Abgesehen davon handelt es sich dabei auch um eine Form der mechanischen Oszillation, die anfällig für Verschleiß ist.

Eine 3D-Abtastung basierend auf MEMS-Systemen wird heutzutage oftmals mit ToF bei 905 nm kombiniert, um ein kostengünstiges, kompaktes System zu bauen. Funktionell zeichnen sich MEMS-Systeme außerdem durch variable Abtastmuster mit hoher Auflösung aus. Technologisch werden oftmals zwei Scanner kombiniert, je einer für eine Achse [92]. Da konventionelle MEMS oft nur kleine FoV bieten, werden in anderen Geräten mehrere Scanner entlang der horizontalen Achse verbaut, die in verschiedene Raumrichtungen zeigen. Dieses Konzept findet sich z. B. in dem Robosense RS-LiDAR-M1 [102] und wird von der Firma Innoviz verfolgt [112].

Verbreitete Vertreter von Solid-State-Systemen sind Flash-LiDARs. Neben der erwähnten Anwendung in Smartphones werden sie auch für industrielle und automobiler Anwendungen eingesetzt. Die Distanzbestimmung erfolgt üblicherweise über die Laufzeitbestimmung. Abgetastet wird der Raum durch optische Projektion mittels Objektiven. Ein Array aus Laseremittern (üblicherweise VCSEL) beleuchtet den gesamten Sichtbereich. Durch ein weiteres Objektiv wird dieser Raumwinkel im Empfangspfad auf ein Detektorarray (üblicherweise SPADs) abgebildet. Entsprechende Systeme besitzen keinerlei bewegliche Komponenten, sind sehr robust und eignen sich deshalb gut für den Automobilmarkt. Nachteile dieser Technologie sind insbesondere die limitierte Reichweite aufgrund der Limitationen durch die Lasersicherheit und durch den beschränkten Sichtbereich, der durch die Optik vorgegeben ist. Kommerzielle Systeme dieser Art sind unter anderem der IbeoNEXT [58], FT120 von Hesai [54] und der Continental HFL110 [26].

3.3.2 Marktanalyse

Wie einleitend in Kapitel 3.3.1 beschrieben wurde, gibt es zum heutigen Zeitpunkt einige Hersteller, die LiDAR-Sensoren speziell für die Automobilindustrie entwickeln. Des Weiteren sind viele Kooperationen zwischen OEM- bzw. Tier1-Firmen und LiDAR-Herstellern bekannt. Firmen, wie Ouster, Velodyne Lidar, Aeva Technologies, AEye, Livox, Cepton, RoboSense LiDAR, Hesai Technology, Ibeo Automotive Systems sind derzeit die größten Firmen, die an der Umsetzung von LiDAR-Sensoren für den Automobilmarkt arbeiten. Aufgrund des Umfangs, wird hier nur eine kleine Auswahl vorgestellt. Eine weitreichende, aktuelle Aufstellung ist in [80] zu finden. Drei vielversprechende Ansätze der Firmen Valeo, Luminar Technologies und Innoviz finden sich in der nachfolgenden Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Übersicht der entscheidenden Leistungsparameter dreier Hersteller.

Parameter	Einheit	Valeo	Luminar	Innoviz
Bezeichnung	-	Scala II	Iris	InnovizTwo
Framerate	Hz	25	30	20
Range	m	≤ 200	250	≤ 300
Horizontale Auflösung	$^{\circ}$	0,125 & 0,25	0,05	0,05
Vertikale Auflösung	$^{\circ}$	0,6	0,05	0,05
Horizontales FoV	$^{\circ}$	133	120	120
Vertikales FoV	$^{\circ}$	10	26	40

Der erste Sensor trägt die Bezeichnung Scala und stammt von der Firma Valeo. Er wurde bereits 2017 im Modell Audi A8 verbaut [144] und wird derzeit in der zweiten Iteration in dem ersten Level 3 Fahrzeug der Mercedes-Benz S-Klasse verwendet [129]. Ab 2024 soll die dritte Version des Sensors in Marken des Konzerns Stellantis verbaut werden [128]. In der aktuellen Konfiguration bietet der Sensor ein FoV von $133^{\circ} \times 10^{\circ}$ mit einer vertikalen Auflösung von $0,6^{\circ}$. Die horizontale Auflösung des Sensors beträgt in der RoI $0,125^{\circ}$ und außerhalb $0,25^{\circ}$ [7]. Die Reichweite eines Targest mit einer Reflektivität von 10 % wird hier mit 200 m bei einer Reflektivität von 80 % und einer TPR von 55 % angegeben.

Nach der Ankündigung der Kooperation mit dem Fahrzeughersteller Volvo im Mai 2020 [133] hat Mercedes-Benz im Januar 2022 eine Kooperation mit Luminar Technologies bekanntgegeben [79]. Der aktuelle LiDAR-Sensor der Firma ist gerichtet, hat die Produktbezeichnung Iris, wird im Dach integriert und ist für Langstrecken-Anwendungen auf der Autobahn ausgelegt. Nach [8] bietet das Gerät ein FoV von $120^{\circ} \times 26^{\circ}$ für Range von 250 m bei einer Reflektivität von 10 % und einer Punktauflösung von $300 \frac{1}{1^{\circ} \cdot 1^{\circ}}$.

Innoviz Technologies ist ein israelischer LiDAR-Hersteller, der zuletzt unter anderem eine Partnerschaft mit CARIAD (Volkswagen) [119] gewinnen konnte. Das Modell InnovizTwo bietet unterschiedliche Funktionsmodi mit einem FoV von von bis zu $120^{\circ} \times 40^{\circ}$ bei einer minimalen partiellen Auflösung von $0,05^{\circ}$. Die Reichweite beträgt bis zu 300 m. Die

Entwicklungsentscheidungen für diesen LiDAR-Sensor finden sich in dem White-Paper der Firma [65], das beschreibt welche Leistungsparameter durch welche Szenarien limitiert sind.

Kapitel 4

Ableitung von Anforderungen für LiDAR-Sensoren

Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die gesetzliche Reglementierung, Richtlinien und definierte Tests für autonome Fahrzeuge und deren Funktionalität. Darauf basierende Szenarien dienen als Grundlage, um Anforderungen für ein Langreichweiten-LiDAR herzuleiten. Die relevanten Leistungsparameter Sichtfeld, Reichweite, Bildrate und Auflösung werden diskutiert und eingestuft. In Bezug auf MEMS-LiDARs werden Leistungsparameter von Scan-Einheiten bestimmt und in Form von Anforderungen an einen Teststand definiert.

4.1 Einschränkung des Einsatzbereichs: Autobahn

Wie bereits in 2.1.1 aufgezeigt wurde, können aktuelle Fahrzeuge der Stufe 3 nur sehr eingeschränkt autonom fahren. Die meisten Assistenzsysteme funktionieren lediglich in einem sehr eingeschränkten Einsatzbereich: Einparken mit langsamen Geschwindigkeiten, Spurhaltung auf Autobahnen für gewisse Geschwindigkeiten. Je kleiner das Feld der Anwendung gewählt wird, desto besser können Risiken und Szenarien abgeschätzt und kontrolliert werden.

Eine der Herausforderungen des autonomen Fahrens liegt in der Vielfältigkeit des Einsatzgebiets: Neben der Nutzung bei extremer Kälte, Wärme oder Feuchte finden sich unterschiedlichste Straßentypen mit diversen Orientierungen, Steigungen und Sichtweite, die zusätzlich etliche Fahrbahnzustände aufweisen können. Ein letzter Aspekt, der ebenfalls anzuführen ist, ist der Verkehr selbst. Dieser kann, je nach Gegebenheit, abweichende Anforderungen an ein autonomes Fahrzeug stellen.

Eine Abgrenzung, die sich deshalb zum heutigen Stand findet, ist die Unterscheidung zwischen der Fahrt in der Stadt („Urban“) und auf Autobahnen („Highway“) (siehe z. B. [52]).

Während die Befahrung der Autobahn auf wenigen, regelten, unidirektionalen Spuren mit hoher Geschwindigkeit erfolgt, finden sich in der Stadt viele zusätzliche Verkehrsteilnehmer, niedrigere Fahrgeschwindigkeiten und komplexe, stark unterschiedliche Straßentypen. Die Fahrt auf Autobahnen weißt eine geringere Vielfalt an verschiedenen Szenarien auf.

Für LiDAR-Sensoren gibt es aufgrund dieser Unterschiede ebenfalls entgegengesetzte Anforderungen. Konzeptionell muss auf Autobahnen nur der Bereich vor dem Fahrzeug detektiert werden, während in der Stadt Passanten von allen Richtungen auftauchen können und somit eine Rundumsicht notwendig wird. Dies führt für die Nutzung in der Stadt auch dazu, dass mehr als ein LiDAR für die Rundumsicht notwendig ist und dass die Positionierung und Datenfusion essentiell ist. Gleichzeitig ist die minimale Reichweite in der Stadt aufgrund kleinerer Geschwindigkeiten und damit kürzeren Bremswege deutlich geringer als auf Autobahnen.

Die Wahl eines dedizierten Einsatzbereichs reduziert die Komplexität und ermöglicht klare Anforderungen. Beide Einsatzbereiche bergen schwierige, stark unterschiedliche Szenarien und stellen Anforderungen verschiedener Art an ein LiDAR. Da die genaue Objektdetektion in großer Entfernung nach aktuellem Stand nur durch LiDAR-Sensoren erfolgen kann, konzentriert sich diese Arbeit auf die Verwendung von LiDAR-Sensoren auf Autobahnen.

4.2 Stand der Technik der Anforderungen

In diesem Kapitel sollen die Haupteinflussfaktoren aufgeschlüsselt und nach dem Stand der Technik erläutert werden. Dies umfasst die Straßenführung, gesetzesspezifische Regularien, Testprozeduren nach Euro NCAP und zuletzt auch bekannte, direkte Anforderungen an LiDAR-Sensoren.

4.2.1 Anforderungen an die Straßenführung

Entscheidungen im Straßenbau haben einen großen Einfluss auf den Verkehr und sind deshalb streng reglementiert. Ein Beispiel dafür sind transeuropäische Netzze (TEN) - im speziellen die Autobahnen (Trans-European Motorways, TEM) der Europäischen Union [118]. In Deutschland ist die Straßenführung von Autobahnen durch die RAA (Richtlinie für die Anlage von Autobahnen) [99] vorgegeben. Die darin beschriebenen Vorschriften, und damit die Geometrie und Topologie von Straßen, bietet Randbedingungen, die für die Bestimmung von relevanten, tatsächlich auftretenden Szenarien herangezogen werden können.

Die folgenden Unterkapitel beschreiben den Zusammenhang zwischen der maximalen Geschwindigkeit und der Haltesichtweite sowie dem minimalen Kurvenradius bei Autobahnen aus der RAA. Für die Betrachtung wird nur auf Arten von Autobahnen eingegangen.

4.2.1.1 Kraftschluss

Entscheidend für jegliche Art von Auslegung ist die Interaktion zwischen Fahrzeugreifen und der Fahrbahn, die durch den Kraftschluss modelliert ist. Dieser kann vektoriell in eine tangentiale (entlang der Fahrtrichtung) und eine radiale Komponente (quer zur Fahrtrichtung) aufgeteilt werden. Die Formeln 4.1 und 4.2 beschreiben diesen Zusammenhang mathematisch nach der empirischen Festlegung (S.539 in [63]). Formel 4.1 wurde im Vergleich zur Referenz für SI-Einheiten abgewandelt.

$$f_{T,\max} = 0,241 \cdot \left(\frac{3,6}{100} \cdot v_0\right)^2 - 0,721 \cdot \left(\frac{3,6}{100} \cdot v_0\right) + 0,708 \quad (4.1)$$

$$f_{R,\max} = 0,925 \cdot f_{T,\max} \quad (4.2)$$

Der maximale tangentiale Kraftschluss $f_{T,\max}$ in Gleichung 4.1 hängt somit nur von der Ausgangsgeschwindigkeit v_0 ab. Diese ist in m s^{-1} einzusetzen. Wie aus Gleichung 4.2 hervor geht, errechnet sich der maximale radiale Kraftschluss $f_{R,\max}$ dann zu 92,5 % des tangentialen Kraftschlusses.

4.2.1.2 Haltesichtweite

Die Haltesichtweite ist ein Begriff aus der Straßenplanung nach RAA [99]. Demnach ist die Haltesichtweite diejenige Strecke, welche notwendig ist, um ein Fahrzeug bei nasser, sauberer Fahrbahn zum Stillstand zu bringen. Die Haltesichtweite S_h setzt sich aus zwei Bestandteilen zusammen: dem Weg während der Reaktion des Fahrers S_1 und dem eigentlichen Bremsweg bei dem das Fahrzeug langsamer wird S_2 . Im ersten Bereich bewegt sich das Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit für die Gesamtdauer aus der Reaktionszeit und Ansprechzeit. Der mathematische Zusammenhang ist in Gleichung 4.3 beschrieben.

$$S_1 = v_0 \cdot t_R \quad (4.3)$$

Nach RAA [99] beträgt die Reaktionszeit für Abschätzungen: $t_R = 2,0 \text{ s}$. Die Ausgangsgeschwindigkeit v_0 ist in m s^{-1} einzusetzen.

Im Gegensatz zu der angenommenen Reaktionszeit von 2 s, errechnet sich die Latenz für Assistenzsysteme aus der Summe der Detektionszeit und der Anspringzeit der Bremsen. Die Detektionszeit beschreibt dabei die notwendige Dauer der Detektion von Objekten. Die Anspringzeit ist durch die Eigenheit der Bremsen gegeben, welche zunächst einen gewissen Bremsdruck aufbringen müssen, bevor sie aktiv in das Fahrgeschehen eingreifen. Diese

Zeit wird üblicherweise mit 0,2 s bis 0,6 s abgeschätzt[61]. Die nachfolgende Gleichung 4.4 zeigt den Zusammenhang.

$$t_{\text{Latenz}} = t_{\text{Detektion}} + t_{\text{Bremsen}} \quad (4.4)$$

Die Latenzzeit t_{Latenz} ist somit die Summe aus der Detektionszeit $t_{\text{Detektion}}$ und der Anspringzeit der Bremsen t_{Bremsen} . Für die Berechnung des Bremswegs aus dem zweiten Abschnitt kann unter Vernachlässigung der Luftreibung folgender Zusammenhang nach Gleichung 4.5 aufgezeigt werden [99] (S. 109). Sie wurde für SI-Einheiten angepasst.

$$S_2 = \frac{v_0^2}{2 \cdot g \cdot \left(f_T(v_0) + \frac{s}{100} \right)} = \frac{v_0^2}{2 \cdot \left(a + g \cdot \frac{s}{100} \right)} \quad (4.5)$$

Hierbei ist v_0 die Anfangsgeschwindigkeit in m s^{-1} , g die Fallbeschleunigung, f_T der tangentielle Kraftschlussbeiwert bestimmt bei der Anfangsgeschwindigkeit nach Gleichung 4.1, s die Längsneigung der Straße und a eine mittlere, konstante Bremsbeschleunigung, die in [99] mit $3,7 \text{ m s}^{-2}$ angegeben ist.

Neben dem dargestellten Modell definiert sowohl die RAA [99] als auch die UNECE [118] Grenzwerte für verschiedene Klassifikationen von Autobahnen, bzw. für zulässige Geschwindigkeiten. Eine Übersicht der Limits ist in der folgenden Tabelle (4.1) zu finden. Für die Grenzwerte der RAA wurden die maximal zulässigen Haltesichtweite bei den Geschwindigkeiten bei Nässe [99] verwendet. Die RAA klassifiziert nach Entwurfsklassen (EKA) [99]. Die zulässigen Maximalgeschwindigkeiten sind in allen Fällen der RAA-Klassifikation höher bzw. nicht definiert. Die Grenzwerte der UNECE sind nach [118] für enge Kurven um 25 % höher, als auf der Geraden.

Tabelle 4.1: Übersicht der Spezifizierten Grenzwerte nach [99, 118].

RAA: Klassifikation	EKA 1A	EKA 1B	EKA 2	EKA 3
Geschwindigkeit in km h^{-1}	130	120	100	80
Haltesichtweite in m	250	250	250	110
UNECE: Klassifikation	TEM			
Geschwindigkeit in km h^{-1}	140	120	100	80
Haltesichtweite (Gerade) in m	325	200	150	100
Haltesichtweite (Kurve) in m	325	200	188	125

Im Vergleich der beiden Grenzwerte zeigt sich, dass die Spezifikation nach RAA ab dem Typ EKA 2 bei 100 km h^{-1} auf eine Haltesichtweite von 250 m limitiert ist, während der

Grenzwert für TEM-Straßen kontinuierlich mit steigender Geschwindigkeit ansteigt. Alle Grenzwerte und das oben aufgezeigte Modell sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

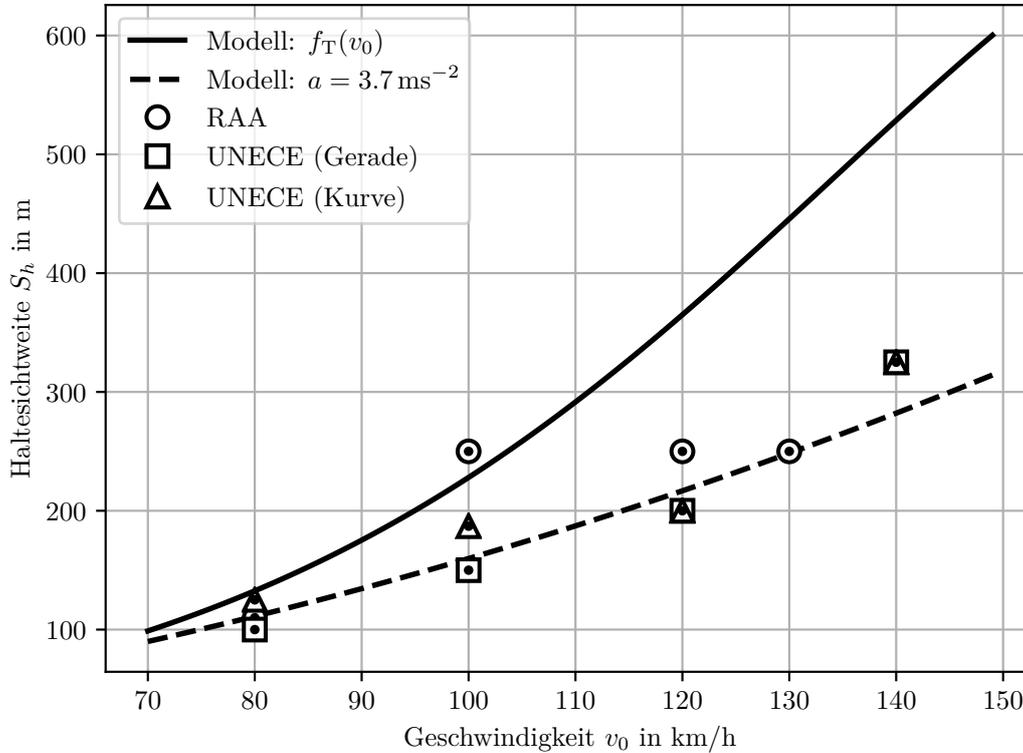


Abbildung 4.1: Haltesichtweiten nach RAA- und UNECE-Spezifikationen.

Im Vergleich zu den diskutierten Grenzwerten ist das Modell aus Gleichung 4.3 und 4.5 deutlich restriktiver. Die notwendigen Haltesichtweiten sind nach dem Modell entsprechend länger als die direkt spezifizierten Grenzwerte. Insbesondere trifft dies für Geschwindigkeiten größer ca. 100 km h^{-1} zu, ab welchen die notwendige Haltesichtweite von 250 m überschritten wird. Grundsätzlich steigt die notwendige Haltesichtweite mit steigender Geschwindigkeit.

Angesichts des großen Unterschieds zwischen den beiden Modellen und den Grenzwerten, wird sich im Folgenden auf die Beschreibung mit konstanter Beschleunigung und auf die spezifizierten Grenzwerte konzentriert. Die beiden Berechnungswege sind vergleichbar. Die Ergebnisse des Modells, welches auf f_T beruht, ist im Vergleich sehr konservativ.

4.2.1.3 Kurvenradius

Eine zweite wichtige Größe, die aus Straßenanforderungen hervorgeht, ist der minimale Radius von Autobahnen. Nach RAA wird bei der Linienführung für Autobahnen [99] das nachfolgende Modell (Gleichung 4.6) verwendet. Sie wurde für SI-Einheiten angepasst.

$$R_{\min} = \frac{v_0^2}{g \cdot \left(f_{R,\max}(v_0) \cdot n \pm \frac{q}{100} \right)} \quad (4.6)$$

Der minimale Kurvenradius R_{\min} berechnet sich demnach aus der Geschwindigkeit v_0 , der Fallbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$, dem maximalen radialen Kraftschluss aus 4.2, einem Ausnutzungsgrad n und der prozentualen Querneigung q . Die Geschwindigkeit ist hierbei in m s^{-1} einzusetzen.

Unter der Querneigung versteht sich die Neigung der Straße quer zur Fahrtrichtung. Diese beträgt zwischen 2,5 % und 6 %, wobei ein negatives Vorzeichen eine Neigung zur Außenseite einer Kurve beschreibt, eine Mindestneigung von 2,5 % ist zur Entwässerung vorgeschrieben [99]. Im Zusammenhang mit der Querneigung ist der Ausnutzungsgrad n zu berücksichtigen. Dieser gibt an welcher Anteil des radialen Kraftschlusses tatsächlich ausgenutzt werden darf. Für Querneigungen zur Kurveninnenseite sind es 50 %, für Querneigungen zur Kurvenpausenseite sind es 30 % [99]. Grundsätzlich sind somit größere Radien für Straßen notwendig, die nach außen hin geneigt sind.

Analog zur Haltesichtweite finden sich auch für die minimalen Radien explizit definierte Grenzwerte in den Dokumenten der RAA [99] und der UNECE [118]. Eine Übersicht der sich ergebenden Grenzwerte aus der RAA [99] sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst 4.2.

Tabelle 4.2: Übersicht der Grenzwerte für minimale Radien nach [99, 118].

RAA: Klassifikation	EKA 1A	EKA 1B	EKA 2	EKA 3
Geschwindigkeit in km h^{-1}	130	120	100	80
Minimaler Radius in m	900	720	470	280
UNECE: Klassifikation	TEM			
Geschwindigkeit in km h^{-1}	140	120	100	80
Minimaler Radius in m	1000	650	450	240

Aus dieser Tabelle geht hervor, dass die Grenzwerte für minimale Radien von Autobahnen nach RAA für alle Geschwindigkeiten restriktiver sind als die zugehörigen Zahlen der UNECE. Der Unterschied zwischen den beiden Definitionen ist allerdings marginal. Bei z. B. 100 km h^{-1} beträgt er nur 20 m (4 %). Der größte relative Unterschied findet sich bei einer Geschwindigkeit von 80 km h^{-1} mit 40 m (ca. 17 %).

Die folgende Abbildung 4.2 zeigt das beschriebene Modell aus Gleichung 4.6 und die Grenzwerte im Vergleich.

Aus Abbildung 4.2 ist ersichtlich, dass die beiden Methoden der Bestimmung qualitativ gut übereinstimmen. Im Vergleich mit den Grenzwerten ist das Modell für den minimale Kurvenradius - mit Ausnahme für eine Geschwindigkeit von 80 km h^{-1} - restriktiver.

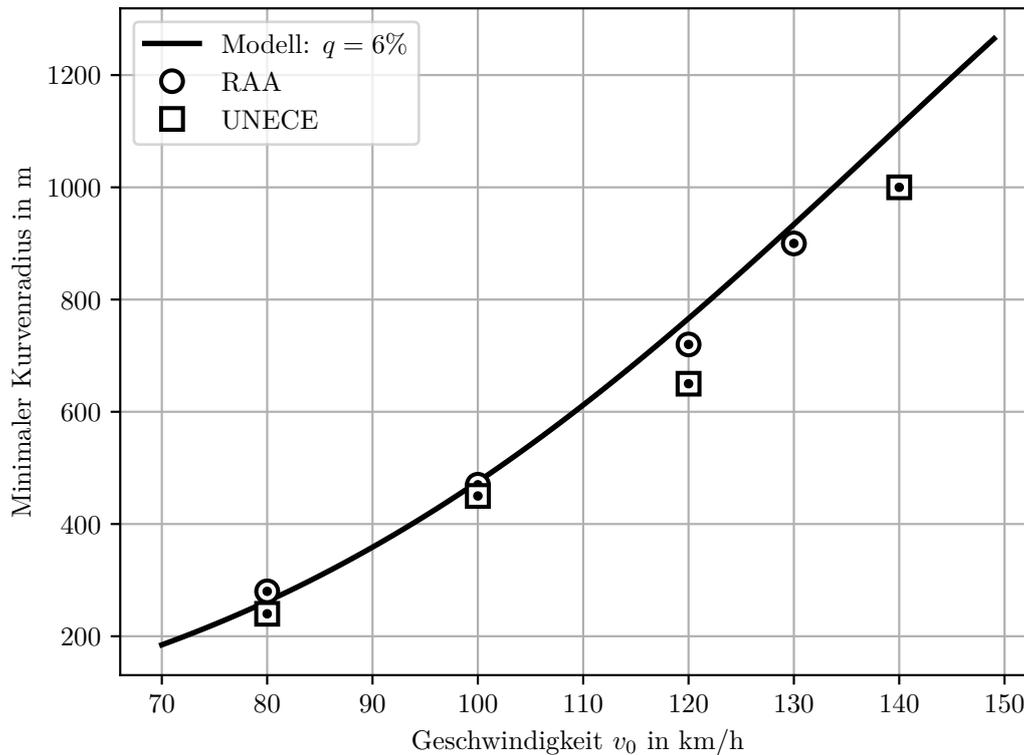


Abbildung 4.2: Minimale Autobahnradien nach RAA und UNECE.

Grundsätzlich steigt der notwendige Kurvenradius mit der Geschwindigkeit. Für die folgenden Berechnungen werden sowohl das Modell als auch die Grenzwerte herangezogen.

4.2.2 Anforderungen an autonome Fahrzeuge und die verwendete Sensorik

Aus den abgeleiteten Rahmenbedingungen der Straßenführung lassen sich Anforderungen an die Verkehrsteilnehmer und im Besonderen an deren Sensorik stellen. Dafür wird zunächst der Stand der Technik in Form der offiziellen Reglementierung und spezifizierten Szenarien vorgestellt.

4.2.2.1 Gesetzesspezifische Regularien am Beispiel der UNECE

Als Teil der Europäischen Union gelten für Deutschland grundsätzlich die staatsübergreifenden Regularien, die von Arbeitsgruppen der Wirtschaftskommission für Europa (UNECE) aufgearbeitet und vorgeschlagen werden. Die Arbeitsgruppe UNECE WP.29 arbeitet derzeit an einer Definition vieler verschiedener Aspekte der Automatisierung.

Ein Beispiel hierfür sind die kürzlich erlassenen ECE-Regelungen R155-R159, welche auf Themen wie z.B. Cyber Security und Spurhalteassistenten (ALKS) [41] eingehen. Nach aktuellem Stand gibt es allerdings noch keine spezifischen Testszenarien oder klaren Regularien, die eine Ableitung von LiDAR-Spezifikationen ermöglichen würde.

4.2.2.2 Testspezifikationen Dritter am Beispiel der Euro-NCAP

Dieses Kapitel zeigt eine Übersicht der wichtigsten Definitionen und Testspezifikationen der Euro NCAP. Diese stellen den Stand der Technik dar und gehören zu den am besten spezifizierten Szenarien für Fahrerassistenzsysteme.

Allgemeine Definitionen der Euro NCAP

Das zu testende Fahrzeuge wird nach Euro NCAP allgemein als VUT („Vehicle Under Test“) abgekürzt [36]. Je nach Test wird von Bremsbeschleunigungen zwischen 5 m s^{-2} [36] und 6 m s^{-2} [38] ausgegangen.

Eine hohe Bedeutung hat auch das sogenannte Global Vehicle Target (GVT) [37]. Dabei handelt es sich um ein Dummy-Fahrzeug, welches aus einem Kunststoffskelett mit Umhüllung besteht und in mit einer motorisierten Plattform Geschwindigkeiten von bis zu 120 km h^{-1} erreichen kann [1]. Der Typ „Hatchback“ misst $4024 \text{ mm} \times 1712 \text{ mm} \times 1427 \text{ mm}$ (Länge, Breite, Höhe). Eine weitere wichtige Eigenschaft, im Besonderen für LiDAR-Sensoren, ist die Reflektivität der Außenhülle. Die Grenzwerte reichen dabei von 10 % für etwa die Reifen bis zu 70 % für die Außenpaneele, die den Lack des Fahrzeugs darstellen sollen [37].

Passanten bzw. Fußgänger werden als gefährdete Fahrbahnnutzer („Vulnerable Road User“, VRU) bezeichnet [38]. Weiterhin sind sie außerdem in Erwachsene („Euro NCAP Pedestrian Target“, EPTa) und Kinder EPTc („Euro NCAP Child Target“, EPTc) aufgeteilt. Ein Erwachsener hat dabei eine Höhe von 1800 mm und eine Breite von 500 mm, ein Kind ist mit einer Breite von 298 mm und einer Höhe von 1154 mm spezifiziert [3]. Je nach Szenario können diese Ziele ebenfalls mittels Plattformen bewegt werden [2]. Die Reflektivität der meisten Flächen des Objekts ist 40 % – 60 % [3].

Übersicht relevanter Testszenarien

Im Oktober 2020 hat die Euro NCAP die ersten Testszenarien für moderne Fahrzeugassistenzsysteme für Außerortsstraßen bzw. Autobahnen bekanntgegeben. Die in diesem Protokoll [36] (S. 21-S. 27) zu testenden Fahrzeugassistenzsysteme sind dabei die Geschwindigkeitskontrolle („Speed Assistance“), die adaptive Geschwindigkeitsregelung („Adaptive Cruise Control“) und der Spurhalteassistent („Steering Assistance“). Die wichtigste Betrachtung liefert dabei die Definition der Tests für den Abstandsregeltempomat („Adaptive Cruise Control“). Abbildung 4.3 veranschaulicht die drei Gruppen. Das VUT ist in gelb,

das GVT ist in rot dargestellt. Die Tabelle 4.3 zeigt die Parametrierung der Testfälle in der Übersicht.

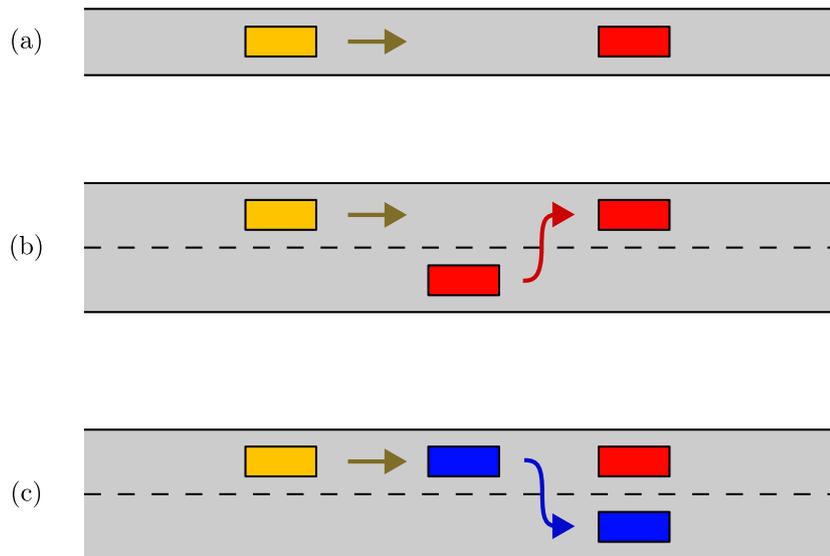


Abbildung 4.3: Darstellung relevanter Testszenarien: (a) Direkte Auffahrunfälle, (b) CUT-IN, (c) CUT-OUT (basierend auf [36] S. 22 ff.).

Tabelle 4.3: Ausschnitt der Parametrierung der ACC Testszenarien der Euro-NCAP aus [36].

	TTC in s	VUT Geschwindigkeit in km h^{-1}	GVT Geschwindigkeit in km h^{-1}	GVT Brems- beschleunigung in m s^{-2}	Spurwechsel- distanz in m
CCRS	10	80; 100; 120; 130	0	-	-
CCRM	10	80; 100; 120; 130	20; 60	-	-
CCRB	10	55	50	-2; -5	-
CUT-IN	0; 1,5	50; 120	10; 70	-	-
CUT-OUT	3	70; 90	50; 70	-	44; 60

Direkte Auffahrunfälle

Die ersten drei Szenarien beziehen sich auf einfache Auffahrunfälle des VUT auf das GVT auf dem gleichen Fahrstreifen in die gleiche Richtung fahren. Diese Szenarien unterscheiden sich generell nur in der Ausprägung der Geschwindigkeit des GVTs (siehe Tabelle 4.3). Bei CCRS - „Car to Car Rear Stationary“ - steht das GVT, bei CCRM - „Car to Car Rear Moving“ - bewegt es sich mit 20 km h^{-1} oder 60 km h^{-1} und bei CCRB - „Car to

Car Rear Breaking“ - bremst es. In allen drei Fällen sind zusätzliche Varianten durch die Geschwindigkeit und die laterale Position des VUTs definiert. Die Zeit bis zur theoretischen Kollision („Time To Collision“, TTC) ist in allen Fällen 10s.

CUT-IN Szenario

Generell tritt ein CUT-IN immer dann auf, wenn ein anders Fahrzeug vor dem Testfahrzeug mit wenig Abstand auf dessen Spur wechselt. Unfallspezifisch wird dieses Fahrverhalten erst dann, wenn das manövrierende Fahrzeug eine niedrigere Geschwindigkeit besitzt oder wenn dieses plötzlich bremsen muss. Der fehlende Mindestabstand führt dann zu Auffahrunfällen.

Zum Start des Tests befindet sich das VUT hinter dem GVT, welches dann beginnt von der Spur ganz rechts auf die Spur des VUTs zu wechseln. Der tatsächlich gefahrene Spurwechsel ist über eine longitudinale und eine laterale Distanz (3,0 m) definiert. Die TTC ist als die Zeit ab dem Moment des Beendens des Spurwechsels des GVTs bis zum möglichen Auffahrunfall definiert. Die Parametrierung der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge findet sich in Tabelle 4.3.

CUT-OUT Szenario

Das CUT-OUT Szenario beschreibt einen speziellen Fall, bei dem ein stehendes Fahrzeug erst sehr spät von dem Testfahrzeug erkannt werden kann, weil es bis zum Ausfädeln eines dritten Fahrzeugs von diesem verdeckt wird. Diese Szenario könnte im realen Straßenverkehr, z. B. an Stauenden oder bei Pannenfahrzeugen, auftreten. Aufgrund der geringen Reaktionszeit beim Erkennen des Hindernisses, ist dies ein gefährliches und dadurch riskantes Szenario.

Zu Beginn des Tests fährt das VUT mit konstanter Geschwindigkeit und folgt einem vorausfahrenden Fahrzeug „leading-vehicle“. Zu einem bestimmten Zeitpunkt verlässt diese Fahrzeug dann die Fahrbahn. Das GVT wird dadurch erst beim Spurwechsel des vorausfahrenden Fahrzeugs für das VUT sichtbar. Ziel dieses Tests ist es herauszufinden, ob das VUT das stehende GVT rechtzeitig erkennt und eingreifen kann, um einen Unfall zu vermeiden.

Ähnlich zu der Definition des CUT-IN ist das Spurwechsel-Manöver des vorausfahrenden Fahrzeugs sowie die Geschwindigkeiten aller Fahrzeuge definiert (siehe Tabelle 4.3). Für dieses Szenario steht die TTC für die Zeit von Beginn bis zum Vollenden des Spurwechsels des vorausfahrenden Fahrzeugs. Gleichzeitig beschreibt sie die Zeit, bis das VUT auf das GVT auffahren würde, wenn davon ausgegangen wird, dass alle Fahrzeuge mit konstanter bestimmter Geschwindigkeit fahren.

4.2.3 Stand der Forschung zu LiDAR-Anforderungen

Wissenschaftlich sind bisher nur wenige Untersuchungen unternommen worden, um Anforderungen für LiDAR-Sensoren für das autonome Fahren herzuleiten. Dennoch finden sich in Bezug auf Marktanalysen auch für LiDAR-Sensoren entsprechende Veröffentlichungen. Roriz et al. erstellte in 2021 eine Übersicht der Technologien und der damals erhältlichen LiDAR-Sensoren für den Automobilmarkt [104]. Die leistungsstärksten Sensoren erreichen nach dieser Aufstellung ein FoV von mindestens $60^\circ \times 30^\circ$ bei einer Auflösung von $0,1^\circ$, einer Reichweite von ca. 200 m und einer Framerate von ca. 20 Hz.

Ein anderer Bereich der Forschung beschäftigt sich mit der Untersuchung notwendiger Anforderungen für LiDAR-Sensoren. Dieser Ansatz entspricht einer „Top-Down“-Methodik und versucht, ausgehend von Szenarien und Randbedingungen, Anforderungen abzuleiten. In 2019 diskutiert Warren verschiedene LiDAR-Technologien und stellt eine Tabelle mit notwendigen Anforderungen für den Nah- und Fernbereich des autonomen Fahrens auf [137]. Vergleichsweise hohe Anforderungen finden sich für die Auflösung von $0,1^\circ$, die Reichweite von bis zu 300 m und die Framerate von 25 Hz.

Im Jahr 2021 kam Bastos et al. mit einer Aufstellung für notwendige Anforderungen für Automobil-LiDAR auf [10]. Daraus geht hervor, dass die Auflösung mit $0,1^\circ$ sehr hoch sein muss. In Bezug auf das FoV genügt demnach eine vertikale Ausprägung von 20° , während das horizontale FoV im besten Fall 360° abdecken sollte. Er führt weiter aus, dass diese Anforderung für das horizontale FoV unter Umständen auch durch mehrere Sensoren erreicht werden kann.

Eine Herleitung der Leistungsparameter wurde durch die Firma Innoviz [65] durchgeführt. Ein besonderer Wert wird hier auf die vertikale Auflösung gelegt. Nach [65] ist sie essentiell für die Detektion von nicht überfahrbaren Hindernissen wie Autoreifen. Damit ein Bremsvorgang rechtzeitig eingeleitet werden kann, müssen diese auf Autobahnen früh erkannt werden, was zur Folge hat, dass die Scanauflösung entsprechend hoch sein muss. Sie wird mit $0,07^\circ \times 0,05^\circ$ angegeben. Weiter wird ausgeführt, dass die Framerate mit 10 Hz bis 20 Hz ausreichend sei, solange die Reichweite bei etwa 200 m für ein kleines schwarzes Target mit einer Reflektivität von 10 % beträgt.

Auch McManamon beschrieb bereits 2019, dass eine Framerate von 10 Hz für die meisten Automobilanwendungen ausreichend sein sollte [78] (Kapitel 11, S. 463). In Bezug auf das FoV wird erstmals eine Einteilung in einen hochauflösenden Zentralbereich mit etwa $30^\circ \times 10^\circ$ und einem Außenbereich von mindestens $120^\circ \times 25^\circ$ gemacht. Zusätzlich soll dieser Zentralbereich adaptiv vertikal verstellt werden können.

Eine kürzlich durchgeführte Untersuchung von Dai et al. [28] leitet notwendige Leistungsparameter für drei verschiedene Arten von LiDAR-Systemen her. Dabei betrachtet die Gruppe ein System, das in zwei Achsen abtastet, eines das zeilenartig beleuchtet und ein Flash-LiDAR, das den gesamten Sichtbereich zugleich aufnimmt. Die Bestimmung

beruht auf geometrischen Berechnungen, die aus Normen und wissenschaftlichen Publikationen abgeleitet worden sind. Die Szenarien fokussieren sich auf Interaktionen mit anderen Fahrzeugen und Fußgängern. Kleine stationäre Objekte auf der Straße werden nicht betrachtet. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass ein scannendes System mindestens ein FoV von $32,6^\circ \times 10,2^\circ$ mit einer minimalen Auflösung von $0,04^\circ \times 0,04^\circ$ mit mindestens 25 Hz abtasten und dabei Objekte in 200 m detektieren muss. Diese Zahlen stellen eine Minimalanforderung dar. In bestimmten Bereichen verschärfen die Autoren die Anforderungen, um noch andere Szenarien zu inkludieren. Eine Zusammenfassung der beschriebenen Anforderungen findet sich in der folgenden Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4: Übersicht der entscheidenden Leistungsparameter

Parameter	Einheit	[104]	[137]	[10]	[65]	[28]
Framerate	Hz	≈ 20	> 25	> 20	10 – 20	25
Range	m	≈ 200	200 – 300	200 – 300	200	200
Horizontale Auflösung	$^\circ$	$\approx 0,1$	0,1 – 0,15	0,1	0,07	0,04
Vertikale Auflösung	$^\circ$	$\approx 0,1$	0,1 – 0,15	0,1	0,05	0,04
Horizontales FoV	$^\circ$	> 60	< 90	360	30	32,6
Vertikales FoV	$^\circ$	> 30	-	> 20	10 + 5	10,2

4.3 Bestimmung der Leistungsparameter

Basierend auf dem beschriebenen Stand der Technik und den aufgezeigten relevanten Testszenarien für Assistenzsysteme auf Autobahnen werden in diesem Kapitel die relevanten und wichtigsten Leistungsparameter für Langstrecken-LiDARs abgeleitet. Dies beinhaltet das Sichtfeld, die Auflösung, die Reichweite und die Bildrate. Zunächst wird das grundsätzliche Vorgehen anhand einer Übersicht aufgezeigt. Im Anschluss werden die einzelnen Leistungsparameter abgeleitet.

4.3.1 Übersicht der kritischen Szenarien

Wie einleitend in Kapitel 2.2.2 beschrieben, sind zur vollständigen Autonomie immer eine Vielzahl von verschiedenen Sensoren notwendig. Der größte Vorteil eines LiDARs gegenüber der anderen verbauten Sensorik ist die hohe örtliche Auflösung in großer Distanz. Diese Eigenschaft ist durch Technologien, wie Radar oder Kameras, nur bedingt und mit großem Aufwand möglich, weshalb diese Funktionalität im Fokus steht.

Bei dieser Betrachtung wird deshalb der Fall des CUT-IN - wie in Kapitel 4.2.2.2 gezeigt - vorerst nicht betrachtet. Dieser Fokus reduziert die Komplexität des Geräts, da keine RoI-Funktionalität (Unterschied zu [65]) notwendig ist. Tabelle 4.5 zeigt die Aufschlüsselung der relevanten Szenarien.

Tabelle 4.5: Übersicht der kritischen Szenarien für die Auslegung der Leistungsparameter von automobilen Langstrecken-LiDARen.

Parameter	Einheit	Szenario
Horizontales FoV	°	Fahrzeug in Kurve
Horizontale Auflösung	°	VRU-Kind
Vertikales FoV	°	Kleinstes Hindernis unter Längsneigung
Vertikale Auflösung	°	Kleinstes Hindernis
Range	m	Haltesichtweite
Framerate	Hz	Haltesichtweite

Wie aus der Tabelle 4.5 hervorgeht, ist die Haltesichtweite ein relevantes Maß für die Framerate und die Range des LiDARs. Hinzu kommt, dass für deren Bestimmung eine Kenntnis über die Detektionszeit notwendig ist. Diese ist letztlich aus den Wahrscheinlichkeiten der Detektion bestimmter Pixel für ein nicht überfahrbares Objekt herzuleiten.

4.3.2 Charakteristiken der Auflösung

Basierend auf dem kleinsten, noch überfahrbaren Hindernis wird in diesem Kapitel eine maximale Größe für die Auflösung eines LiDARs bestimmt.

4.3.2.1 Kritisches Hindernis

Die Hauptaufgabe des LiDARs für die spezifizierte Anwendung, ist die Detektion und genaue Entfernungsbestimmung von Objekten in großer Distanz. Diese Aufgabe ist für ein LiDAR insbesondere dann kritisch, wenn das Objekt sehr klein ist und eine geringe Reflektivität aufweist. Das Fahrzeug muss dann entscheiden, ob das Überfahren ohne Schaden möglich ist. Konkret handelt es sich dabei um verlorenes Transportgut, wie z. B. Autoreifen [65]. Dabei wird von einer Höhe von 140 mm und einer Breite von 365 mm ausgegangen.

In Bezug auf die horizontale Auflösung sind dünne Hindernisse limitierend. Ein wahrscheinliches Szenario ist dabei das Vorhandensein von Passanten auf der Fahrbahn. Insbesondere Kinder als VRU wären in diesem Zusammenhang kritisch. Nach Euro-NCAP [38] bzw. ACEA [3] ist das Kind mit seiner geringe Breite von nur 298 mm limitierend.

Da das Fahrzeug im Betrieb beide Objekte detektieren können muss, ist die Kombination der beiden Größen als kritisches Objekt zu definieren. Es weist damit die Abmaße von 140 mm × 298 mm auf. Es muss mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von einem LiDAR so früh und so schnell detektiert werden, dass das Fahrzeug noch in der Lage ist rechtzeitig zu bremsen.

4.3.2.2 Absolute Pixelgröße

Der erste Anhaltspunkt für die Ableitung der Leistungsparameter ist die Wahrscheinlichkeit, mit der ein solches kritisches Objekt zu detektieren ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Abtastung mit einem rechteckigen FoV, quadratischer Messauflösung und einem lückenlosen regulären Raster erfolgt. Das bedeutet außerdem, dass die Messauflösung der Scanauflösung entspricht.

Wie in Kapitel 3.2.1 zu den Limitation der Distanzbestimmung beschrieben wurde, ist die Detektion immer an eine Wahrscheinlichkeit gekoppelt. Außerdem ist in diesem Zusammenhang relevant, dass diese bei partiellen Treffern deutlich sinkt. Der erste Aspekt führt dazu, dass immer mindestens zwei vertikale Pixel detektierbar sein müssen. Die Möglichkeit von partiellen Treffern ist dadurch zu verhindern, dass grundsätzlich immer ein Pixel zusätzlich auf das Messobjekt treffen soll. Mathematisch errechnet sich die minimale quadratische Messauflösung aufgrund der Höhe des Fahrzeugreifens zu: $px = \frac{140\text{mm}}{3} = 46,67\text{mm}$. Die beiden Extremfälle der Orientierung zwischen dem Abtastmuster und dem Hindernis sind in Abbildung 4.4 gezeigt. Mit diesen Annahmen ist im zweiten Schritt die notwendige maximal zulässige absolute Messauflösung auf dem kritischen Objekt zu bestimmen.

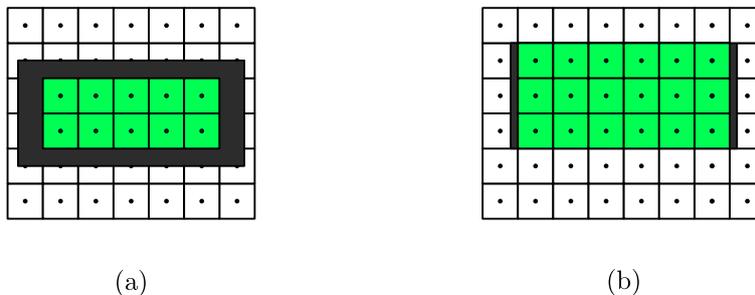


Abbildung 4.4: Kleinst mögliches Hindernis (schwarz), die nicht detektierten Pixel (weiß) und die Detektionen (grün): (a) schlechteste Ausrichtung und (b) beste Ausrichtung.

Wie in (a) zu sehen ist, ergibt sich für den schlimmsten Fall der Ausrichtung somit eine Überlagerung von fünf horizontalen Pixeln in zwei Reihen übereinander. Die maximal messbare Größe, die in jedem Fall von einem schlimmsten Hindernis gemessen werden kann, ist somit: $233\text{mm} \times 93\text{mm}$. Im Gegensatz dazu würden sich nach (b) in besonderen Fällen eine Überlagerung von 3×6 Pixeln ergeben und so Größen bis $280\text{mm} \times 140\text{mm}$ messbar machen.

4.3.3 Detektionsraten

Als zweite essentielle Anforderung sind die Wahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen, mit der eine korrekte Detektion des Hindernisses möglich ist. Diese hängen sowohl stark von der Anzahl der Pixel auf dem Hindernis, als auch von der direkten Anforderung für eine Detektion ab. Die sich ergebenden Detektionsraten sind dann mit Grenzwerten zu vergleichen, die unter Umständen von Automobilherstellern gefordert werden könnten.

In diesem Kapitel werden mögliche Grenzwerte für die TPR und die FPR für realistische Werte abgeschätzt. Im Anschluss können auf Basis der Detektionsraten pro Pixel die Wahrscheinlichkeiten für einzelne Frames abgeschätzt werden. Letztlich wird anhand einer Matrix ein möglichst effizienter Detektionszyklus festgelegt, der aussagt, wie viele Frames aufzunehmen sind, um innerhalb der Grenzwerte eine Detektion zu gewährleisten.

4.3.3.1 Ableitung von Grenzwerten

Zur Spezifikation von Grenzwerten für die Detektionsraten sind sowohl die TPR als auch die FPR zu berücksichtigen. Während die TPR bzw. die FNR angibt, wie oft ein tatsächlich vorkommendes Hindernis erkannt oder nicht erkannt wird, beschreibt die FPR und damit auch die TNR, wie dies auf ein nicht vorhandenes Hindernis zutrifft. Basierend auf dem Szenario und einigen Annahmen für die Häufigkeit eines solchen Auftretens, können Grenzwerte abgeleitet werden, welche von LiDARen erreicht werden müssen.

TPR und FNR

Anstelle der Berechnung der notwendigen TPR soll sich in diesem Kapitel auf die FNR konzentriert werden, da es deutlich einfacher ist, eine Aussage darüber anzustellen, wie oft eine Fehldetektion zu erlauben ist.

Zunächst ist das Problem auf ein Fahrzeug zu reduzieren und zu beurteilen, wie häufig das Szenario eines auf der Fahrbahn liegenden Reifens in der Realität vorkommt. Da Objekte auf Fahrbahnen und insbesondere Fahrzeugreifen im allgemeinen relativ häufig vorkommen - verlässliche Zahlen dazu aber nicht vorliegen - wird für die weitere Bewertung angenommen, dass ein PKW im Mittel ein solches Hindernis einmal pro Lebenszeit begegnet. Der Erwartungswert für solch ein Szenario auf die Lebensdauer ist somit: $\mu = 1$. Da die Wahrscheinlichkeit letztlich nicht nur auf ein Fahrzeug, sondern einer Serie zutreffen soll, muss noch deren Größe mitberücksichtigt werden. Als Worst-Case wird dazu die Statistik eines der meistverkauften Fahrzeuge - dem VW Golf VI - herangezogen. Dieser wurde 2,85 Millionen mal gebaut [138]. Die Grenzwert für die Fehldetektion eines kleinsten Hindernisses errechnet sich schließlich zu: $P_{\text{FNR, Grenzwert}} = 1/N = 3,51 \times 10^{-7}$. Der Grenzwert für die TPR ergibt sich damit zu: $P_{\text{TPR, Grenzwert}} = 1 - P_{\text{FNR, Grenzwert}} = 1 - 3,51 \times 10^{-7}$.

FPR und TNR

Die FPR behandelt, wie oben beschrieben, den Fall, dass ein Hindernis detektiert wird, das in der Realität nicht vorhanden ist. Ein solches Vorkommnis kann jederzeit auftreten und dazu führen, dass das eigene Fahrzeug plötzlich bremst oder ausweicht. Diese Fahraktion kann dann dazu führen, dass andere Fahrzeuge auffahren. Da dieser Vorfall ebenfalls kritische Folgen haben kann, allerdings nicht zwangsläufig in einem Unfall endet, ist das Risiko niedriger zu bewerten. Da auch hierzu verlässliche Daten fehlen, wird ein Faktor $\times 10$ angenommen. Somit errechnet sich: $P_{\text{FPR, Grenzwert}} = 1/10 \cdot P_{\text{FNR, Grenzwert}} = 3,51 \times 10^{-8}$. Da eine Fehldetektion nicht nur einmal in der Lebensdauer eines Fahrzeugs, sondern in jedem Detektionszyklus an verschiedenen Stellen im FoV auftreten kann, ist der Grenzwert für einen Zyklus entsprechend kleiner. Nach [72] unter Bezug auf einen internen Teststandard von VW [132] ist die geforderte minimale Betriebszeit eines Fahrzeugs 8000 h. Es ist der Multiplikator aus der Anzahl der Detektionszyklen innerhalb dieser Zeit zu berechnen. Ausgehend von einer Framerate von 30 Hz ergibt sich ein Faktor von: $M = 8000 \text{ h} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \cdot 30 \text{ Hz} = 8,64 \times 10^8$. Je nach Anzahl der notwendigen Frames für eine Detektion skaliert der Wert linear. Dies führt letztlich zu dem folgenden Grenzwert: $P_{\text{FPR, Hindernis, Grenzwert}} = 1/M \cdot P_{\text{FPR, Grenzwert}} = 4,06 \times 10^{-16}$.

4.3.3.2 Berechnung der Detektionsraten pro Frame

Aus den Ergebnissen, welche in Abbildung 4.4 gezeigt wurden, ging hervor, dass immer mindestens fünf Pixel in zwei Zeilen auf dem Hindernis existieren. Dieser Sachverhalt wird für die weitere Untersuchung fest angenommen.

Eine vollständige Abdeckung der Pixelgruppe mit dem Hindernis ist kein Garant dafür, dass die Pixel auch ein Objekt detektieren. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben wurde, ist jede Messung mit zumindest einer TPR und einer FPR behaftet. Für die Bestimmung der Raten soll sich zunächst auf die TPR konzentriert werden. Jede Kombination aus Pixeln, wie z. B. die Detektion von zwei aus vier Pixeln, lässt sich dann mithilfe der Binomialverteilung aus Gleichung 3.5 bestimmen.

Für die korrekte Identifikation eines Hindernisses ist allerdings nicht nur die Anzahl der Pixel relevant, sondern auch, welcher Pixel im einzelnen detektiert wird. Hier soll im Besonderen die Höhe des Objekts bestimmt werden. Aus diesem Grund muss sichergestellt werden, dass z. B. nicht nur eine Zeile aus fünf Pixeln detektiert wird. Stattdessen wäre eine sinnvolle Metrik die Detektion von mindestens drei aus fünf Pixeln pro Reihe. Besondere Ausprägungen einer solchen Anordnung sind in der nachfolgenden Abbildung 4.5 gezeigt.

Die Wichtigkeit dieser Metrik liegt darin begründet, dass zum einen immer mindestens zwei Pixel in naher Umgebung übereinander erkannt werden müssen, zum anderen aber auch keine großen Lücken entstehen dürfen. Die beiden Fälle (a) und (b) zeigen dabei mögliche

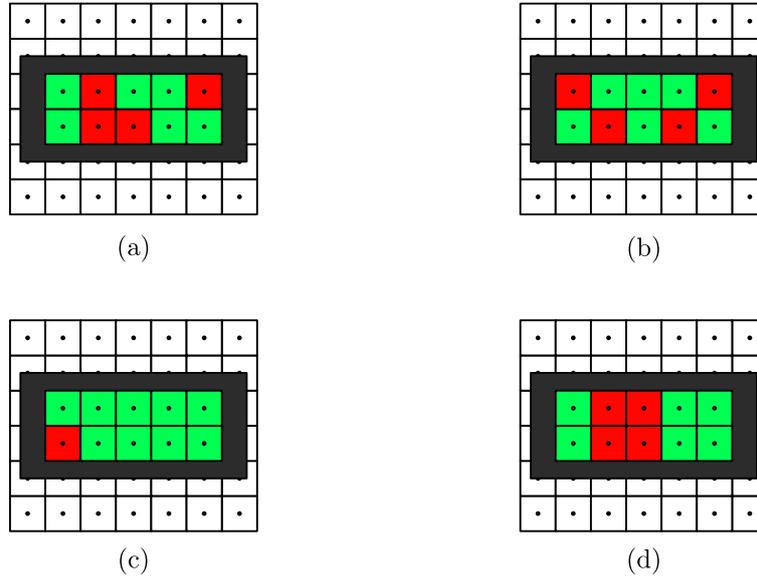


Abbildung 4.5: Mögliche Kombinationen aus detektierten Pixeln (grün) und nicht detektierten Pixeln (rot) bei einer Metrik von mindestens drei aus fünf pro Zeile.

zufällig verteilte Detektionen, die noch immer die gesamte Größe des Hindernisses gut abdecken. Die Möglichkeiten (c) veranschaulicht, dass durch diese Metrik auch Ereignisse inkludiert sind, die mehr als drei positive besitzen. Der Worst-Case dieser Metrik ist in (d) dargestellt. Hier handelt es sich um genau drei von fünf Detektionen, welche in einem Cluster angesammelt sind. Die entstehenden Lücken sind somit maximal 2×2 Pixel groß und beschränken sich auf eine Fläche von $93 \text{ mm} \times 93 \text{ mm}$.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine solche Detektionsmetrik in einem Frame erreicht wird, lässt sich mithilfe der Binomialverteilung bestimmen. Wird zunächst nur eine Zeile betrachtet, so kann das Problem auf eine Wahrscheinlichkeit von drei aus fünf zurückgeführt werden. Im zweiten Schritt muss die zweite Zeile miteinbezogen werden. Da die Wahrscheinlichkeit für die korrekte Detektion einer Zeile bekannt ist, lässt sich das Problem so zerlegen, dass nach der korrekten Detektion von zwei Zeilen gleichzeitig zu fragen ist. Dies stellt in sich selbst eine Binomialverteilung mit den Teilwahrscheinlichkeiten pro Zeile dar und lässt sich als zwei von zwei formulieren. Vereinfacht ist dieser Sonderfall auch als Quadrat der Teilwahrscheinlichkeiten berechnen. Basierend auf diesen Annahmen kann somit die TPR für ein Frame wie folgt mittels Gleichung 4.7 allgemein bestimmt werden.

$$P_{\text{Frame}} = \left\{ \sum_{k=k_{\min}}^n \left[\binom{n}{k} \cdot p_{\text{Pixel}}^k \cdot (1 - p_{\text{Pixel}})^{n-k} \right] \right\}^M \quad (4.7)$$

Die TPR pro Frame für das spezifizierte Hindernis $P_{\text{Frame, TPR}}$ errechnet sich für zwei Zeilen mit $M = 2$ aus der Summe der Teilwahrscheinlichkeiten mit der Anzahl der Pixel pro Zeile $n = 5$ und der Mindestanzahl der detektierten Pixel $k_{\min} = 3$. Der Parameter für die Anzahl der detektierten Pixel k läuft dabei von k_{\min} bis n . Die TPR pro Pixel wird als $p_{\text{Pixel, TPR}} = 0.9$ angenommen [81]. Werden diese Größen eingesetzt, so ergibt sich eine TPR von $P_{\text{Frame, TPR}} = 98,2953\%$. Das Ergebnis hat zur Folge, dass ein solch existierendes Hindernis auf der Straße in einem Frame mit einer Wahrscheinlichkeit von über 98% detektiert werden kann.

Die zweite wichtige Kenngröße für die Detektion pro Frame ist die FPR. Sie lässt sich ebenfalls mit Gleichung 4.7 bestimmen, indem anstelle der Einzelwahrscheinlichkeit p_{Pixel} die FPR pro Pixel angezogen wird. Diese wird aktuell oft mit $p_{\text{Pixel, FPR}} = 2 \times 10^{-3}$ angegeben. Für die FPR pro Frame ergibt sich somit $P_{\text{Frame, FPR}} \approx 6 \times 10^{-15}$ für den Bereich des Sichtfelds, den ein solches Hindernis einnehmen würde. Wird davon ausgegangen, dass eine solche Fehldetektion überall im FoV auftreten kann und dass die Punktwolke aus etwa 500×10^3 Pixeln besteht, errechnet sich: $P_{\text{Frame, TPR}} = 3 \times 10^{-10}$.

4.3.3.3 Berechnung von Detektionsraten pro Zyklus

Um aus den TPR und FPR der einzelnen Frames eine Gesamtwahrscheinlichkeit für die Detektion eines Objekts abschätzen zu können, muss letztlich berücksichtigt werden, dass nicht nur ein Frame, sondern eine Vielzahl von Frames kontinuierlich aufgenommen werden. Für die Detektion eines Objekts ist es demnach ausreichend, wenn Teile in aufeinanderfolgenden Frames erkannt werden.

Für den Detektionszyklus ist in [65] die Formulierung 4oo7 („4 out of 7“) verwendet worden. Nach Ihren Simulationen und Annahmen kommt es dann zu einer TPR von 99,9975% bei einer Detektion eines Fahrzeugreifens. Im folgenden wird unter Berücksichtigung der spezifizierten minimal zu erreichenden TPR und minimal erlaubten FPR ein Detektionszyklus bestimmt. Durch diese Anforderungen werden eine optimale und minimale Detketionszeit erreicht.

Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit über mehrere Frames wird erneut die Binomialverteilung aus Gleichung 3.5 verwendet. Für diese Betrachtung ist es erneut relevant, mindestens eine gewisse Anzahl von Frames richtig zu detektieren. Aus diesem Grund kann Gleichung 3.7 verwendet werden. Die Abwandlung für diesen Fall ist in Gleichung 4.8 dargestellt.

$$P = \sum_{K=K_{\min}}^N \left[\binom{N}{K} \cdot P_{\text{Frame}}^K \cdot (1 - P_{\text{Frame}})^{N-K} \right] \quad (4.8)$$

Gleichung 4.8 berechnet die Detektionsrate bzw. Wahrscheinlichkeit P für die Detektion von mindestens K_{\min} Frames aus einer Untergruppe von N Frames. Erneut handelt es sich dabei um die Summe der TPRs, die sich aus den Konfigurationen für jeden einzelnen Frame K ergeben. Die Wahrscheinlichkeit, mit der jeder einzelne Frame als richtig-positiv detektiert wird, ergibt sich aus Gleichung 4.7.

Das Gegenstück zur TPR, die FPR, kann ebenfalls mithilfe von Gleichung 4.8 bestimmt werden, indem für die Einzelwahrscheinlichkeit $P_{\text{Frame, FPR}} = 3 \times 10^{-10}$ verwendet wird. Diese Berechnungsmethode ist sehr konservativ, da nicht berücksichtigt wird, dass Detektionen innerhalb eines Zyklus im gleichen Abstand erfolgen müssen, um als echte bzw. reale Detektion zu zählen. Die FPR pro Frame würde sinken. Da diese Eigenschaft extrem von dem tatsächlichen Algorithmus abhängen würde, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

4.3.3.4 Bestimmung eines optimalen Detektionszyklus

Ziel der Untersuchung ist es, ein möglichst kleines K_{\min} bei möglichst kleinem N zu finden, bei dem die sich ergebende TPR nach Gleichung 4.8 errechnet zu: $P_{\text{TPR}} \geq P_{\text{TPR, Grenzwert}} = 0,99999965$. Der Grenzwert stammt aus den Berechnungen in 4.3.3.1. Gleichzeitig ist zu beachten, dass mit kleinen K_{\min} auch immer hohe FPR bestehen. Das bedeutet, dass auch für die FPR gelten muss, dass die berechnete Wahrscheinlichkeit kleiner ist, als der Grenzwert von $4,06 \times 10^{-16}$.

Um das Optimum zu finden, ist die TPR für jeden möglichen Detektionszyklus von $N \in]0; 15]$ und $K_{\min} \in]0; N]$ mit $N, K_{\min} \in \mathbb{N}_0$ berechnet worden. Die Kombinationen aus K_{\min} und N , welche die Anforderungen $P_{\text{TPR}} \geq P_{\text{TPR, Grenzwert}}$ und $P_{\text{FPR}} \leq P_{\text{FPR, Grenzwert}}$ erfüllen, sind in Abbildung 4.6 in einem 2D-Raster dargestellt.

Die FNR-Matrix in (a) aus Abbildung 4.6 ist grundsätzlich für kleine K_{\min} und große N nahe $P_{\text{TPR}} = 1$. Dies ist schlüssig, da jede beliebige Zahl von $K > K_{\min}$ mit in die Gesamtwahrscheinlichkeit eingeht. Alle weißen Bereiche erfüllen nicht die geforderten Grenzwertbedingungen. Mit steigendem K_{\min} bei konstantem N fällt die TPR. Dies ist lediglich am oberen Rand der farblich markierten Konfigurationen ersichtlich, da der Größenunterschied im restlichen Bereich für die Darstellung zu klein ist. Per Definition gilt für alle Kombinationen bei $K_{\min} = 0$; $P_{\text{TPR}} = 1$, da die Wahrscheinlichkeit, mindestens $K = 0$ Frames aus einer Gruppe von N Frames zu detektieren, alle Möglichkeiten einschließt. Der Grenzbereich, der gerade noch die Anforderungen erfüllt, findet sich an der oberen Kante.

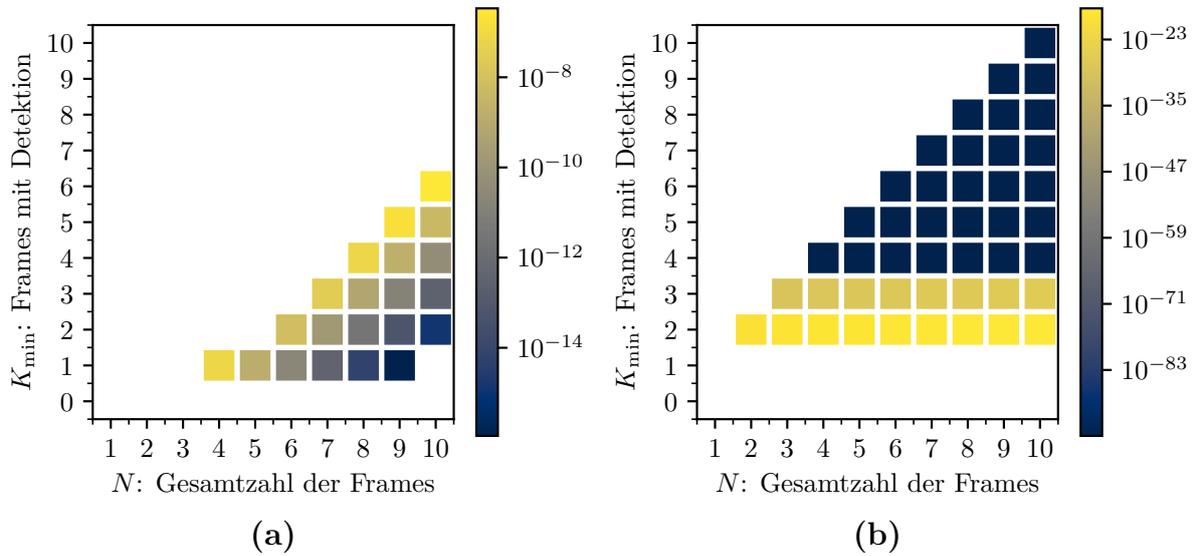


Abbildung 4.6: 1-TPR (a) und FPR (b) für alle K_{\min} und N die innerhalb der jeweiligen Grenzwerte liegen. Die Farbskalen zeigen die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten.

Die FPR-Matrix in (b) aus 4.6 ist farblich in der Darstellung ebenfalls beschränkt. Die Anforderung an die FPR hat den unteren Bereich für kleine K_{\min} abgeschnitten. Dies hängt damit zusammen, dass die falsche Detektion von wenigen Frames K in der Gesamtheit aus N wahrscheinlicher ist, als wenn mehr Frames zur Beurteilung berücksichtigt werden können. Die geringste FPR gibt es somit bei $K_{\min} = N = 10$ mit $P_{\text{FPR}} = 1,06 \times 10^{-95}$. Letztlich sind nur jene Bereiche relevant, die sowohl die notwendige TPR aufweisen, als auch eine ausreichend geringe FPR besitzen. Die Überlagerung der beiden Matrizen miteinander ist in Abbildung 4.7 gezeigt.

Aus den dargestellten, validen Konfigurationen für Detektionszyklen ist letztlich das Optimum zu bestimmen. Dieses liegt dort vor, wo möglichst wenige Gesamt-Frames N benötigt werden, für die die Grenzwerte dargestellt in 4.7 eingehalten werden. Da die FPR-Grenzwerte bereits ab $K = 2$ für alle N eingehalten werden, lässt sich diese Zeile herausgreifen. Sie ist in Tabelle 4.6 mit den resultierenden TPRs und FPRs aufgelistet. Die Ergebnisse sind auf eine Dezimalstelle gerundet worden.

Die resultierende optimale Konfiguration ergibt sich somit zu **2006**, da hier alle Anforderungen erfüllt sind und gleichzeitig eine minimale Anzahl von N benötigt wird, um das Objekt zu detektieren. Demnach reicht es aus, sechs Frames für eine Entscheidung abzuwarten. Das mindestens zwei dieser Frames eine positive Detektion zeigen ist dann mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens $P_{\text{TPR}} = 99,999\,999\,15\%$ gegeben.

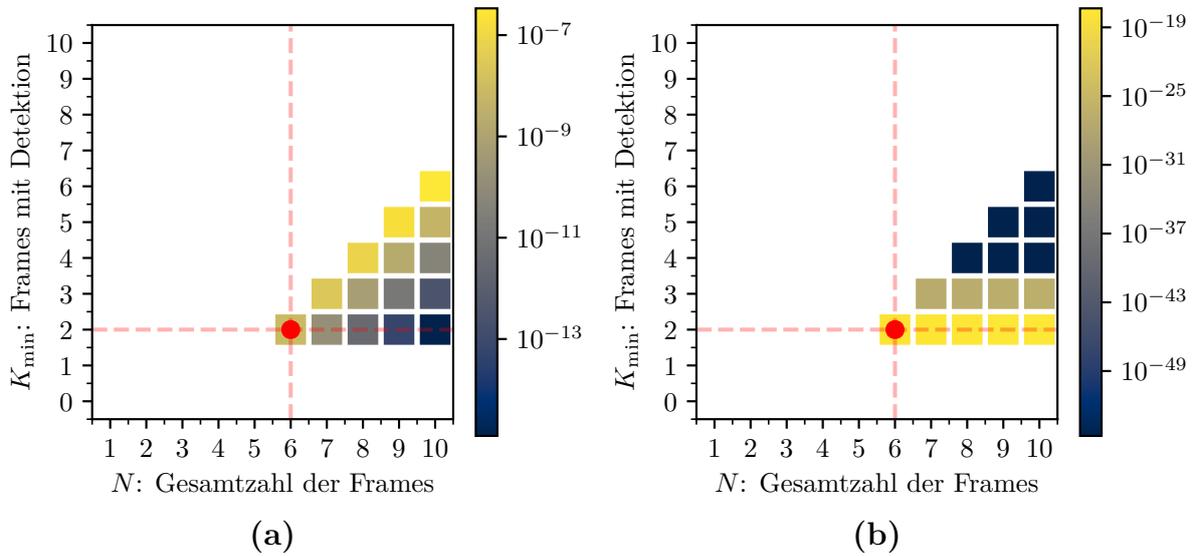


Abbildung 4.7: 1-TPR (a) und FPR (b) für alle K_{\min} und N die innerhalb beider Grenzwerte liegen. Die Farbskalen zeigen die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten.

Tabelle 4.6: Übersicht der möglichen Detektionszyklen.

Detektionszyklus	K_{\min}	N	$1 - P_{\text{TPR}}$	P_{FPR}
2006	2	6	8,5e-09	1,5e-18
2007	2	7	1,7e-10	2,12e-18
2008	2	8	3,3e-12	2,83e-18
2009	2	9	6,3e-14	3,64e-18
20010	2	10	1,2e-15	4,55e-18

4.3.4 Bildrate

Zur Bestimmung der Bild- bzw. Framerate ist die notwendige Latenzzeit beim Bremsen für den oben bestimmten Detektionszyklus von 2006 zu berücksichtigen. Je höher diese Rate ist, desto häufiger wird die Szene gescannt und desto geringer ist dadurch die Detektionszeit. Die Latenz, die für eine solche Detektion betragen darf, ist grundsätzlich nicht festgehalten; sie hängt allerdings stark mit dem Leistungsparameter des Bremswegs zusammen und muss deshalb möglichst klein sein.

Aus Gleichung 4.4 für die Latenzzeit und dem Zusammenhang zur Framerate $t_{\text{Detektion}} = \frac{N}{fps}$ für einen Detektionszyklus von 2006 ($N = 6$) lässt sich eine Latenzzeit berechnen. Die nachfolgenden Abbildung 4.8 zeigt diese gegenüber der Framerate.

Es ist ersichtlich, dass die Reaktion eines Assistenzsystems bei den oben getroffenen Annahmen für alle Frameraten kürzer ist, als es aktuell für einen Mensch angenommen

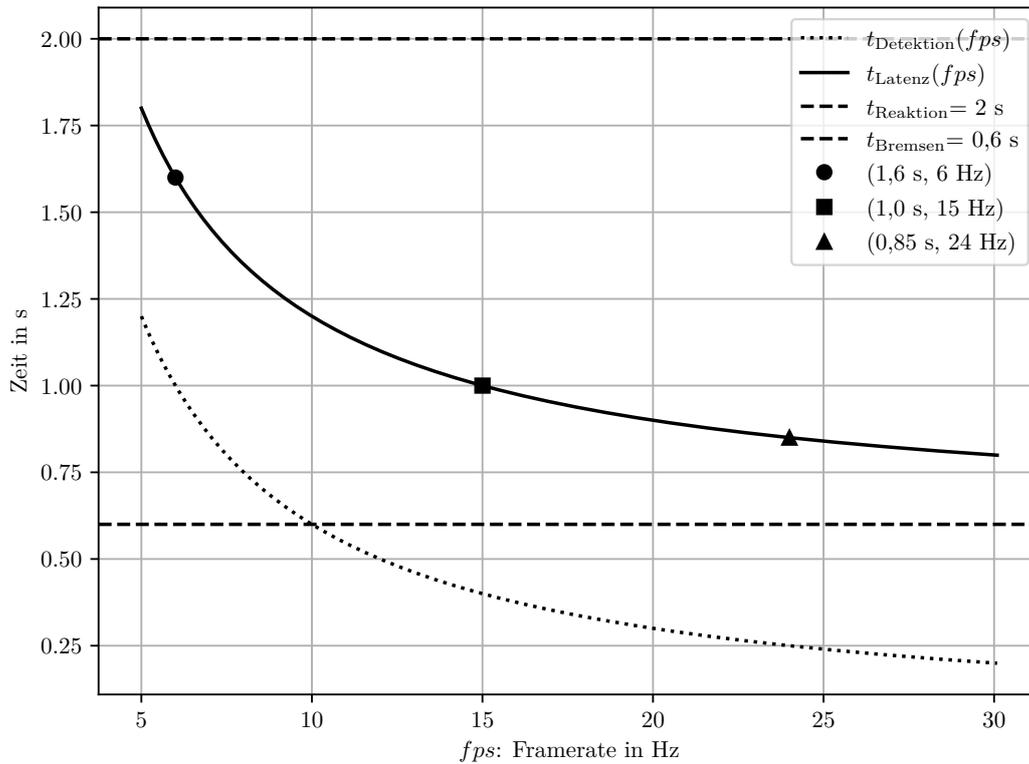


Abbildung 4.8: Verschiedene Reaktionszeiten gegenüber der Framerate.

wird. Die Bremszeit t_{Bremsen} ist für alle Frameraten konstant, während die Detektionszeit $t_{\text{Detektion}}$ mit steigender Framerate abfällt. Als mögliche Arbeitspunkte sind Latenzzeiten von $t_{\text{Latenz}} = \{0,85 \text{ s}; 1,0 \text{ s}; 1,6 \text{ s}\}$ markiert. Diese würden zu den zugehörigen, notwendigen Frameraten von $f_{\text{ps}} = \{24 \text{ Hz}; 15 \text{ Hz}; 6 \text{ Hz}\}$ führen. Im weiteren sollen alle drei Möglichkeiten für die Bestimmung der Range in Betracht gezogen werden.

Letztlich können LiDAR-System Framerate für Range oder Range für Framerate eintauschen. Sieht ein autonomes Fahrzeug nur weit genug, kann die Framerate auch langsam sein. Ist hingegen die Framerate hoch, so kann die Detektion auch erst später und damit näher am Fahrzeug geschehen.

4.3.5 Reichweite

Die notwendige Range eines LiDARs orientiert sich im Grenzfall ebenfalls an dem kleinst möglichen Hindernis. Das System muss in der Lage sein, ein solches Objekt schnell genug zu erkennen und zu bremsen, so dass ein Unfall vermieden werden kann. Es ist davon auszugehen, dass die Reflektivität des definierten Objekts ca. 10 % beträgt. Das ist der Wert, der aus den Testspezifikationen der Euro NCAP hervorgeht [37]. Weiterführend ist anzunehmen, dass für ein Pixelfüllendes Zielobjekt die Detektionsraten von $p_{\text{Pixel, TPR}} = 0.9$

und $p_{\text{Pixel}}, \text{FPR} = 2 \times 10^{-3}$ gelten [81]. Ferner ist die oben spezifizierte absolute Auflösung auf dem Messobjekt zu erwägen, um die Detektion sicherzustellen.

Wie in Kapitel 4.2.1.2 beschrieben, lässt sich der nötige minimale, absolute Bremsweg als Haltesichtweite bestimmen. Es wird von einer Bremsbeschleunigung von 6 m s^{-2} (Kapitel 4.2.2.2) bei einer Längsneigung von 0% ausgegangen. Die nachfolgende Abbildung 4.9 zeigt die notwendige, absolute Haltesichtweite gegenüber der Framrate.

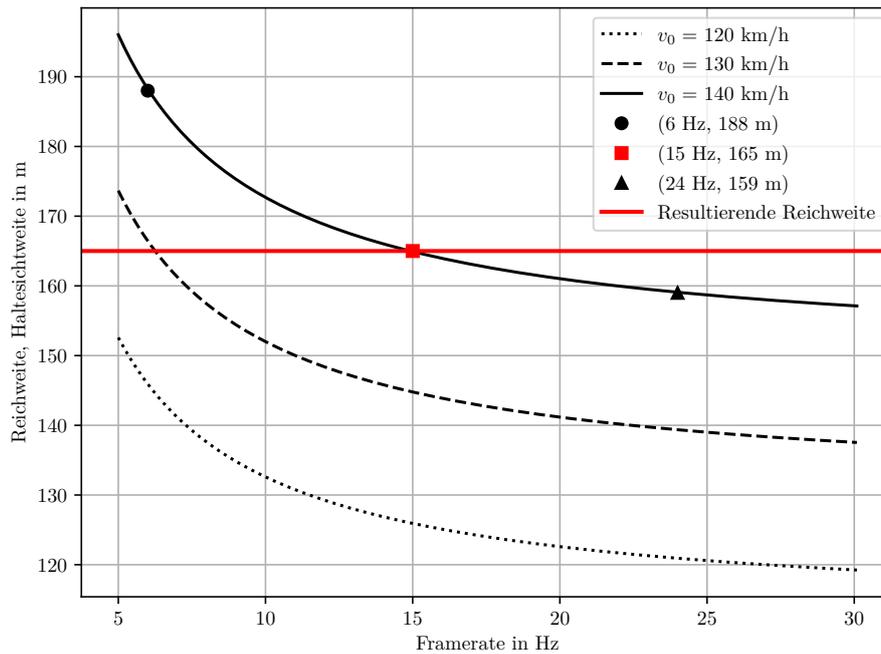


Abbildung 4.9: Haltesichtweite gegenüber der Framrate für verschiedene Geschwindigkeiten.

Für die Auslegung des LiDARs wird die maximal spezifizierte Geschwindigkeit der UNECE [118] von 140 km h^{-1} verwendet (durchgezogen). Die drei vermerkten Arbeitspunkte bei $f_{ps} = \{24 \text{ Hz}; 15 \text{ Hz}; 6 \text{ Hz}\}$ sind mit Punkten für die maximale Geschwindigkeit zu $S_h = \{159 \text{ m}; 165 \text{ m}; 188 \text{ m}\}$ markiert.

Wie aus Abbildung 4.9 ersichtlich ist, führt eine Erhöhung der Framrate nicht im gleichen Maße zu einer Reduzierung der Haltesichtweite. Kleine Framraten benötigen hohe Reichweiten, während große Framraten technisch schwierig umzusetzen sind und zu geringen Range-Gewinnen führen. Obwohl theoretisch nichts gegen die Raten bei 6 Hz oder 24 Hz spricht, wird deshalb eine Framrate von 15 Hz als Minimalanforderung festgelegt. Die notwendige Haltesichtweite entspricht dann 165 m (rote Linie).

Die hier spezifizierte Reichweite hängt nur von den Detektions- und Bremseigenschaften des Fahrzeugs ab. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Fahrbahn gerade ist. Die Auswirkungen von Niederschlag oder Nebel auf die Leistungsparameter des LiDARs

wurden nicht berücksichtigt.

Aus den hier aufgestellten Überlegungen ist demnach eine Reichweite von 165 m und eine Framerate von 15 Hz notwendig, um ein Hindernis mit 10 % Reflektivität bei einer Pixel-TP-Wahrscheinlichkeit von 0.9 zu detektieren und rechtzeitig zu bremsen.

4.3.6 Horizontale und vertikale Auflösung

Die horizontale und vertikale Scannauflösung des Systems hängt einzig von dem kleinsten Objekt ab, welches noch detektierbar sein muss. Wie im Kapitel zur absoluten Auflösung beschrieben wurde, handelt es sich dabei um eine Kombination aus einem Fahrzeugreifen (vertikal) und einem Kind (horizontal). Das Hindernis umfasst dann die Abmaße $140 \text{ mm} \times 298 \text{ mm}$. Mit einer Pixelgröße von $46,67 \text{ mm} \times 46,67 \text{ mm}$ entsteht dann ein Überlagerung von mindestens 5×2 Pixeln mit dem Hindernis. Dies ist ausreichend, um das Hindernis mit einer Framerate von 15 Hz in einer Distanz von 165 m zu detektieren. Aus diesen Werten lässt sich über die geometrische Beziehung die Auflösung im Winkelraum nach Gleichung 4.9 herleiten.

$$\Delta\gamma = \arctan\left(\frac{px}{S_h}\right) \quad (4.9)$$

Die Scannauflösung $\Delta\gamma$ hängt somit einzig von der absoluten Pixelgröße px und der Reichweite S_h ab. Werden die Größen von oben verwendet, errechnet sich die Auflösung im Winkelraum schließlich zu: $\Delta\gamma(px = 46,67 \text{ mm}, S_h = 165 \text{ m}) = 0,016^\circ$. Das kleinste Hindernis hat demnach im Winkelraum mindestens eine Größe von $0,08^\circ \times 0,032^\circ$.

4.3.7 Vertikales Sichtfeld

Nachdem die Reichweite und die Auflösung des LiDARs bestimmt wurden, lässt sich im Folgenden das vertikale FoV ableiten. Dieses Kapitel beschreibt, wie das vertikale Sichtfeld für die Detektion eines kleinsten Hindernisses bei verschiedenen Straßenneigungen berechnet werden kann.

Beschreibung des Szenarios

Dieses ist im dynamischen Fahrgeschehen so zu wählen, dass kleinste Hindernisse in der maximalen Haltesichtweite erkennbar sind - insbesondere, wenn die Straßenführung eine Längsneigung aufweist. Steigt oder fällt die Straße, können Hindernisse unter Umständen nicht erkannt werden, da die Orientierung des LiDARs nicht nachgeregelt wird. Überstehende bzw. überhängende Ladung, wie sie z. B. in [65] beschrieben wird, stellt einen besonderen Fall dar. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass Hindernisse im Nahbereich

durch die restlichen Sensoren detektiert werden.

Im Folgenden wird anhand der Straßenlängsneigung ein minimal notwendiges vertikales FoV berechnet. Abbildung 4.10 veranschaulicht das Szenario geometrisch.

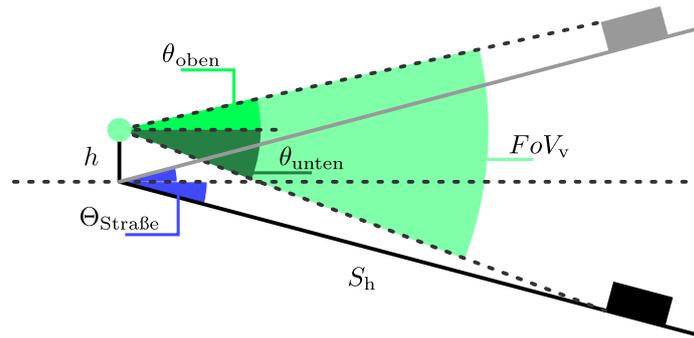


Abbildung 4.10: Bezeichnung des vertikalen FoVs.

Abbildung 4.10 illustriert, wie sich ein minimal erreichbares vertikales FoV (FoV_v) aus dem oberen Anteil θ_{oben} und dem unteren Anteil θ_{unten} zusammensetzt. Die Kombination der beiden Grenzfälle für eine ansteigende und eine abfallende Straße machen das vertikale FoV aus. Das LiDAR ist in der Höhe h über der Fahrbahn befestigt und parallel zum Horizont ausgerichtet. Die Straße steigt bzw. fällt in beiden Fällen mit dem maximal zulässigen Wert von $s = 4\%$ nach [99]. Über die Beziehung des Tangens lässt sich ein maximaler absoluter Winkel von $\Theta_{\text{Straße}} = 2,29\%$ berechnen. Das Hindernis befindet sich im Abstand der Haltesichtweite S_h .

Abschüssige Straße

Um das Problem mathematisch genauer beschreiben zu können, wird zunächst der Fall der abschüssigen Straße betrachtet. Der Fußpunkt des Hindernisses muss für eine Detektion noch innerhalb des vertikalen FoVs liegen. Abbildung 4.11 zeigt den geometrischen Zusammenhang mit den relevanten Größen.

Der untere maximale Neigungswinkel θ_{unten} (grün) erstreckt sich vom Horizont zum Fußpunkt des Hindernisses. Gleichung 4.10 beschreibt den Zusammenhang. Die Parameter A und B sind Hilfsgrößen.

$$\tan(\theta_{\text{unten}}) = \frac{1}{\cos(\Theta_{\text{Straße}})} \cdot \left[\sin(\Theta_{\text{Straße}}) + \frac{h}{S_h} \right] \quad (4.10)$$

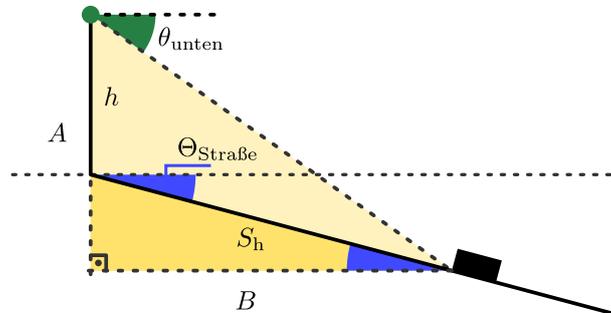


Abbildung 4.11: Mathematischer Zusammenhang für das vertikale FoV für eine abfallige Straße.

Der Tangens des unteren Neigungswinkel errechnet sich demnach aus dem Straßenlängsneigungswinkel $\Theta_{\text{Straße}}$, der Einbauhöhe h und der Haltesichtweite S_h . Es gilt: $h \ll S_h$. Für eine theoretische Einbauhöhe von $h = 50$ cm, einer Haltesichtweite von $S_h = 165$ m und einer Straßensteigung von $s = 4\%$ errechnet sich so ein unterer minimaler Neigungswinkel des Sichtfelds von $\theta_{\text{unten}} = -2,5^\circ$.

Ansteigende Straße

Zur Bestimmung des oberen Neigungswinkels des LiDARs wird ebenfalls eine geometrische Betrachtung eines Hindernisses in der Haltesichtweite vorgenommen. Bei ansteigender Straße muss das LiDAR mindestens noch die obere Kante des Objekts im Sichtfeld haben. Dies ist der größte Unterschied im Vergleich zu dem Szenario der abfallenden Straße, wo der Fußpunkt detektiert werden sollte. Abbildung 4.12 zeigt eine schematische Darstellung mit den wichtigsten Größen zu Bestimmung.

Das Hindernis (schwarz) mit der Höhe t befindet sich im Abstand S_h auf einer Straße, welche eine einen Längsneigungswinkel $\Theta_{\text{Straße}}$ (blau). Das LiDAR ist in der Höhe h über der Fahrbahn verbaut; das Fahrzeug befindet sich auf ebener Straße vor dem Abschnitt mit Steigung. Der obere Neigungswinkel des LiDARs θ_{oben} ist in grün markiert. Die Parameter A, B, C, D und t_l, t_v sind Hilfsgrößen zur Ableitung. Gleichung 4.11 beschreibt den abgeleiteten Zusammenhang.

$$\tan(\theta_{\text{oben}}) = \frac{S_h \sin(\Theta_{\text{Straße}}) - h + t \cos(\Theta_{\text{Straße}})}{S_h \cos(\Theta_{\text{Straße}}) - t \sin(\Theta_{\text{Straße}})} \quad (4.11)$$

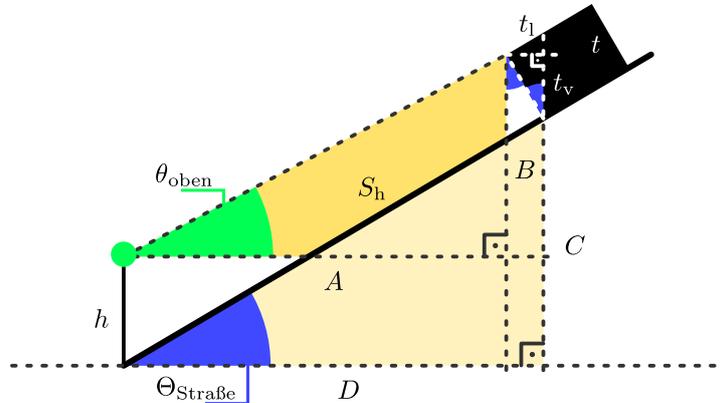


Abbildung 4.12: Geometrischer Zusammenhang für das vertikale FoV für eine ansteigende Straße.

Zu beachten ist, dass dieser Zusammenhang nur zutrifft für: $h < C$. Für PkWs und eine maximale Straßenlängsneigung von 4% trifft dies immer zu.

Für die angenommene Einbauhöhe von $h = 50$ cm, einer Haltesichtweite von $S_h = 165$ m und einer Straßensteigung von $s = 4\%$ und einer Hindernishöhe von $t = 14$ cm errechnet sich so ein oberer minimaler Neigungswinkel des Sichtfelds von $\theta_{\text{oben}} = 2,2^\circ$.

Berücksichtigung anderer Einflussgrößen

Nachdem das notwendige vertikale FoV aus der Straßenlängsneigung ermittelt worden ist, gilt es noch weitere Größen zu berücksichtigen. Dazu gehören: die Einbautoleranzen, die Kalibriertoleranzen und die ladungsabhängige Neigung des Fahrzeugs. Andere Einflussgrößen, wie die Neigungsänderung beim Beschleunigen oder Bremsen sowie der Einfluss von Schlaglöchern, sind aufgrund des Szenarios auf Autobahnen zu vernachlässigen.

Die Einbautoleranzen ergeben sich aufgrund der Tatsache, dass der Einbau des Sensors im Fahrzeug mit großen Winkeltoleranzen versehen ist. Ein gängiger Wert für Radar-Sensoren ist $\pm 2^\circ$ [127] (S. 29).

Die Kalibriertoleranz ist eine Eigenschaft des LiDARs und ist auf die Fertigung zurückzuführen. Durch eine Kalibrierung am Ende der Produktion kann der Restfehler minimiert werden. Dieser wird, angelehnt an die die Ergebnisse von [11] von ca. $0,14^\circ$ ($0,0024$ rad), mit $\pm 0,1^\circ$ angenommen.

Der letzte relevante Wert ergibt sich aus den Szenarien verschiedener Beladungen: Je nach Gewicht kann dies zu einem zusätzlichen Neigungswinkel des Fahrzeugs führen, was wiederum die Ausrichtung des FoVs verändert. Abgeleitet von den Regularien für

Nebelscheinwerfer (Nach [39], Anhang 9, 1.3.2, S.113) kann ein Wert von $+1,9^\circ$ (Fahrzeugneigung: 3,3%) für Einbauhöhen kleiner 0,8 m als Worst-Case angenommen werden. Für Einbauhöhen größer 1,2 m gibt dieselbe Quelle einen Wert von $2,2^\circ$ an.

Alle Größen sind für drei verschiedene Einbauhöhen von in der nachfolgenden Tabelle 4.7 zusammengefasst. Die Höhe von $h = 142,7$ cm entspricht dabei der Gesamthöhe des Testfahrzeugs nach Euro NCAP[37].

Tabelle 4.7: Berechnete Größen zum vertikalen FoV.

Einflussfaktor	Wert in $^\circ$		
	$h = 20$ cm	$h = 50$ cm	$h = 140$ cm
Straßenlängsneigung	+2,3; -2,4	+2,2; -2,5	+1,9; -2,8
Einbautoleranzen	± 2		
Kalibriertoleranzen	$\pm 0,1$		
Ladungsbedingter Winkel	+1,9	+1,9	+2,2
Gesamtes FoV	+4,4; -6,4	+4,3; -6,5	+4; -7,1
Absolutes FoV	10,8	10,8	11,1

Das vertikale FoV errechnet sich maximal zu $11,1^\circ$. Je nach Einbauhöhe ändert sich der Ausgangs-Neigungswinkel (Mittelwert). Das notwendige vertikale FoV eines LiDARs für die Langreichweitenanwendung auf Autobahnen für eine Haltesichtweite von 165 m, eine maximale Straßenlängsneigung von 4% und eine Hindernishöhe von 0,14 m errechnet sich aufgerundet somit zu 12° .

4.3.8 Horizontales Sichtfeld

Zur Bestimmung des notwendigen horizontalen Sichtfelds wird in diesem Kapitel zunächst das relevante Szenario beschrieben. Daraus wird im Anschluss ein geometrisches Modell für die Auslegung aufgestellt, Toleranzen diskutiert und letztlich ein Wert bestimmt.

Beschreibung des Szenarios

Wie bereits von [28, 65] beschrieben, ist das kritischste Szenario für die Auslegung des horizontalen FoVs die Fahrt in der Kurve. Hierbei ist es relevant, dass das Fahrzeug ein Hindernis am Rand des FoV früh genug erkennt, um bei hoher Geschwindigkeit noch abbremsen zu können. Als Worst-Case-Szenario kann hier die Anforderung weiter verschärft werden, wenn in diesem Abstand ein Objekt auch auf einer der weiteren Fahrbahnen detektiert werden muss. Dabei könnte es sich z. B. um einen Unfall mit VUTs handeln, welche unter Umständen quer zur Straße auf die eigene Fahrbahn laufen. Die nachfolgende Abbildung 4.13 zeigt das Szenario und den mathematischen Zusammenhang der relevanten

Größen aus der Vogelperspektive. Im folgenden wird ein geometrisches Modell für das beschriebene Szenario aufgestellt.

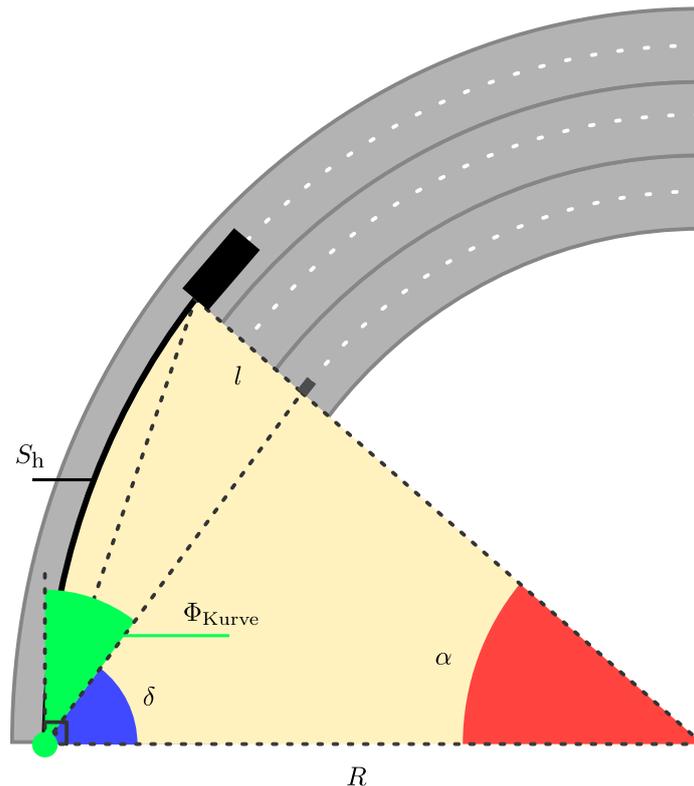


Abbildung 4.13: Mathematischer Zusammenhang für das Kurvenszenario zur Bestimmung des horizontalen FoVs aus der Vogelperspektive.

Wie aus Abbildung 4.13 hervorgeht fährt das mit dem LiDAR ausgestattete Fahrzeug auf der linken Spur einer Autobahn mit drei Fahrstreifen. Die Fahrbahn beschreibt eine Kurve mit dem Radius R , welche mit der Geschwindigkeit v_0 ausgelegt wurde. In dem gezeigten Szenario steht das Fahrzeug am Beginn einer Kurve (grüner Punkt); gleichermaßen trifft die Abstraktion aber auf jeden Zeitpunkt in der Kurve zu, da die Orientierung und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs tangential zur Kurve stehen. Das Hindernis (schwarz, bzw. grau) wird sich in diesem Vorfall auf der gleichen Spur und damit auf dem Kreisbogen befinden. Die Distanz bis zum Stoppen des Fahrzeugs ist die Haltesichtweite S_h . Im gezeigten Startpunkt muss das LiDAR in der Lage sein, ein Objekt auf der Fahrbahn rechts außen zu erkennen. Der Abstand der eigenen und der äußersten Fahrbahn hat die

Länge l und ist nur durch die Fahrbahnbreite festgelegt. Für den gezeigten Fall mit einem Abstand von zwei Fahrbahnen zu je 3,75 m [99] wird von $l = 7,5$ m ausgegangen.

Geometrisches Modell

Der aufgespannte Winkel aus dem Geschwindigkeitsvektor und der Strecke AC beschreibt dann das halbe horizontale FoV ohne Toleranzen (Φ_{Kurve}). Zur Ermittlung dieses Winkels werden die Hilfswinkel δ und der Mittelpunktswinkel α definiert. Der halbe horizontale FoV-Winkel lässt sich durch Gleichung 4.12 beschreiben.

$$\tan(\Phi_{\text{Kurve}}) = \frac{1}{\sin\left(\frac{S_h}{R} \cdot \frac{180}{\pi}\right)} \cdot \left[\frac{R}{R-l} - \cos\left(\frac{S_h}{R} \cdot \frac{180}{\pi}\right) \right] \quad (4.12)$$

Somit ist Φ_{Kurve} abhängig von der Haltesichtweite S_h , dem Kurvenradius R und der Fahrbahndistanz l . Hierbei ist zu beachten, dass sowohl die Haltesichtweite als auch der gegebene Kurvenradius von der Geschwindigkeit abhängen. Die beiden Zusammenhänge sind durch die Regularien und die Modelle aus Gleichung 4.3, 4.5 und Gleichung 4.6 gegeben (siehe Kapitel 4.2.1). Die restriktivste Anforderung ergibt sich dabei immer durch den minimalen Kurvenradius und der maximalen Haltesichtweite. Dies lässt sich auch aus der Abhängigkeit in Gleichung 4.12 schließen.

Berücksichtigung anderer Einflussgrößen

Um letztlich eine Anforderung an das horizontale FoV zu stellen, müssen noch externe Randbedingungen berücksichtigt werden. Wie in 3.2.3 beschrieben, ist insbesondere das FoV stark von den mechanischen Toleranzen geprägt. Hier betrifft dies die Einbautoleranz in Richtung des Gierwinkels. Durch die nachfolgende Gleichung 4.13 lässt sich schließlich eine Anforderung für das horizontale FoV bestimmen.

$$FoV_h = 2 \cdot \left(\Phi_{\text{Kurve}} + \Delta\Phi_{\text{Kalib}} + \Delta\Phi_{\text{Einbau}} \right) \quad (4.13)$$

Das notwendige horizontale FoV eines Langstrecken-LiDARs für die Autobahn errechnet sich demnach aus dem doppeltem Winkel der Summe aus dem über das Szenario bestimmten Winkels Φ_{Kurve} aus Gleichung 4.12, dem Winkelfehler aus der Kalibrierung $\Delta\Phi_{\text{Kalib}}$ und der Einbautoleranz $\Delta\Phi_{\text{Einbau}}$. Da beide Toleranzen beidseitig auftreten können, muss nicht nur Φ_{Kurve} , sondern auch beide Toleranzwinkel verdoppelt werden. Wie beim vertikalen FoV wird von Einbautoleranzen von 2° [127] und Kalibriertoleranzen von $0,1^\circ$ ausgegangen [11].

Durch Kombination der Gleichungen für das FoV 4.12, 4.13 mit den Bestimmungen für die Haltesichtweite 4.3, 4.5 und den minimalen Kurvenradius 4.6 lässt sich eine

Anforderung für das horizontale FoV in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. der Straßenkategorie ermitteln. Die nachfolgende Abbildung 4.14 zeigt diese Abhängigkeit.

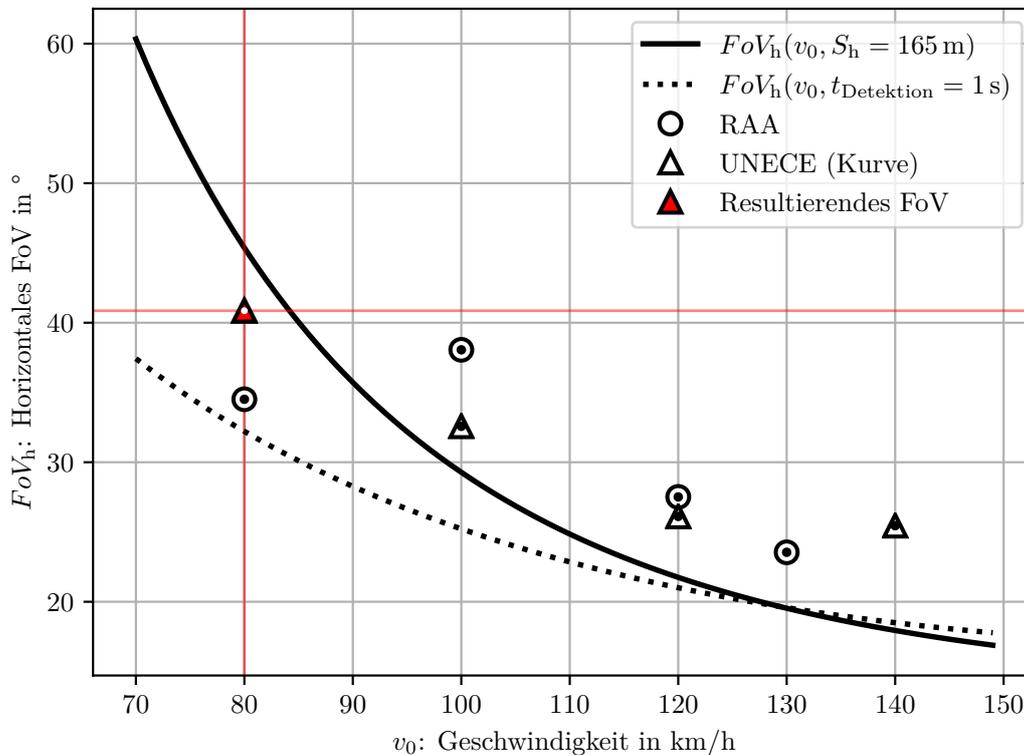


Abbildung 4.14: Anforderung an das horizontale FoV gegenüber der Anfangsgeschwindigkeit für das Modell und die Regularien aus [99, 118].

Der durchgezogene Graph in Abbildung 4.14 stellt den Fall dar, dass das LiDAR kleinste Hindernisse in der vollen spezifizierten Range von 165 m bei jeder Geschwindigkeit erkennen muss. Dies ist allerdings nicht zwangsläufig notwendig, da die notwendige Haltesichtweite mit reduzierter Geschwindigkeit abnimmt. Als minimale Anforderung wäre es für das Fahrzeug notwendig, gerade noch vor dem Hindernis stehen zu bleiben; die gestrichelte Kurve beinhaltet diese Annahme für eine allgemeine Detektionszeit von 1,0 s und einer mittleren Bremsbeschleunigung von $6,0 \text{ m s}^{-2}$ (Kapitel 4.2.2.2) bei einer Straßenlängsneigung von 0° . Im Vergleich der beiden Kurven fällt auf, dass beide abfallen und sich mit steigender Geschwindigkeit immer stärker annähern. Mit Ausnahme des Modells mit der konstanten Haltesichtweite lässt sich der Trend auf die Kombination aus der Haltesichtweite (4.1) und des minimalen Kurvenradius (4.2) zurückführen. In das horizontale FoV nach 4.13 gehen die beiden Größen stark unterschiedlich ein: Größere Radien führen zu kleineren Fahrbahnkrümmungen und damit zu kleineren notwendigen FoVs. Die größeren Haltesichtweiten führen im Gegensatz dazu zu höheren FoVs.

Festlegung eines Grenzwertes

Die errechneten FoV aus den Grenzwerten der Regularien (RAA und UNECE) sind mit Punkten und Vierecken in Abbildung 4.14 dargestellt. Sie befinden sich mit der Ausnahme der Geschwindigkeit bei 80 km h^{-1} für die RAA-Limits über der Modellkurve für eine Detektionszeit von 1 s. Das größte notwendige horizontale FoV ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 80 km h^{-1} für den UNECE-Standard mit $40,9^\circ$. Die Tatsache, dass die Grenzwerte für hohe Geschwindigkeiten anspruchsvoller sind, hängt damit zusammen, dass sie für menschliche Fahrer ausgelegt sind und somit grundsätzlich von längeren Reaktionszeiten und kleineren Bremsbeschleunigungen von $3,7 \text{ m s}^{-2}$ ausgehen.

Da die Anforderung an das LiDAR für alle Geschwindigkeiten gelten soll und hohe FoVs anspruchsvoller sind, muss eine Extremabschätzung angewandt werden. Als niedrigste relevante Autobahngeschwindigkeit wird die Geschwindigkeit von 80 km h^{-1} gewählt, da diese auch in beiden Regularien definiert ist. Die Minimalanforderung, um rechtzeitig bremsen zu können, ergibt sich dabei anhand des gestrichelten Graphen zu $32,2^\circ$. Soll das LiDAR hingegen in der Lage sein, ein kritisches Hindernis in der vollen spezifizierten Reichweite von 165 m zu detektieren, so müsste es ein horizontales FoV von $45,4^\circ$ besitzen. Der höchste Grenzwert bei dieser Geschwindigkeit kommt von der UNECE und verlangt ein FoV von $40,9^\circ$.

Obwohl die spezifizierten Grenzwerte, wie erwähnt, für menschliche Fahrer ausgelegt und deshalb nicht 1:1 auf autonome Fahrzeuge übertragbar sind, ist die Einhaltung der Grenzwerte ein relevanter Maßstab. Aus diesem Grund wird ein aufgerundetes horizontales FoV von 41° aus dem Ergebnis der UNECE-Richtlinien bei 80 km h^{-1} als Minimalanforderung spezifiziert (rote Markierung in Abbildung 4.14).

4.4 Diskussion der resultierenden Leistungsparameter

Die Anforderungen an ein LiDAR für die Anwendung auf Autobahnen sind im Detail hergeleitet worden. In Anbetracht der Fülle an Information und Komplexität beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Aufarbeitung der Ergebnisse. Es soll diskutiert werden, wie die Ergebnisse im Vergleich zur Literatur und den auf dem Markt erhältlichen Systemen einzustufen sind. Ferner wird aus den bestimmten Parametern eine Anforderung für ein Messsystem für LiDAR-MEMS-Scanner hergeleitet.

4.4.1 Vergleich der Ergebnisse mit dem Stand der Technik

Als Grundlage für eine Beurteilung der Anforderungen werden die Ergebnisse mit dem Stand der Technik aus der Tabelle 4.4 verglichen (Tabelle 4.8). Werden die Ergebnisse als

Ganzes betrachtet, so fällt auf, dass bis auf die Auflösung, alle Anforderungen schon jetzt von vielen erhältlichen LiDAR-Systemen erreicht werden.

Tabelle 4.8: Vergleich der bestimmten Anforderungen mit dem Stand der Technik.

Parameter	Unit	Results	[104]	[137]	[10]	[65]	[28]
Frame Rate	Hz	15	≈ 20	> 25	> 20	10 – 20	25
Range	m	165	≈ 200	200 – 300	200 – 300	200	200
Horizontal Resolution	°	0,016	$\approx 0,1$	0,1 – 0,15	0,1	0,07	0,04
Vertical Resolution	°	0,016	$\approx 0,1$	0,1 – 0,15	0,1	0,05	0,04
Horizontal FoV	°	41	> 60	< 90	360	30	32,6
Vertical FoV	°	12	> 30	-	> 20	10 + 5	10,2

Die bestimmte Framerate von 15 Hz wird von einem Großteil der erhältlichen Sensoren erreicht [104]. Diese Rate ist generell mit etwa 20 Hz beziffert. Dies stimmt mit [10] überein, welche 20 Hz als untere Grenze definiert. Warren [137] und Dai et al. [28] empfehlen eine Framerate von > 25 Hz. Innoviz errechnet 10 Hz – 20 Hz für diese Anforderung [65]. Die Literaturwerte stimmen somit mit der bestimmten Zahl überein, insbesondere, wenn berücksichtigt wird, dass hier ebenfalls aufgezeigt wurde, dass höhere Framerraten in Kombination mit geringeren Reichweiten denkbar sind.

In Bezug auf die Range werden kommerziell meist 200 m versprochen [104]. Wie bereits einleitend erwähnt, sind diese Zahlen aber oftmals nur maximal mögliche Reichweiten, und treffen somit nicht für schwach reflektierende Targets bei Sonnenlicht zu. Dai et al. [28], Warren [137] und Bastos et al. [10] definiert diesen Parameter mit 200 m – 300 m, was auch für solche Targets ein deutlich realistischer Wert ist. Letztlich ist die Angabe von Innoviz mit 200 m bei einer Reflektivität von 10 %, die aussagekräftigste, da diese auch die Beschaffenheit des Targets mit einschließt. Die hier bestimmte Zahl von 165 m folgt den Anforderungen der Literatur. Der Unterschied kann dadurch bestehen, dass hier eine Minimalanforderung abgeleitet wurde, die außerdem eine gewisse Bremsverzögerung annimmt, welche unter Umständen bei schlechten Witterungsbedingungen nicht immer eingehalten werden kann. Eine Reduktion dieser Bremsbeschleunigung würde einen längeren Bremsweg und damit eine höhere notwendige Range bedeuten.

Der Leistungsparameter, der nach [104] aktuell von keinem erhältlichen System erreicht werden kann, ist die Auflösung. Er ist im besten Fall mit etwa $0,1^\circ$ spezifiziert, was eine Größenordnung über dem hier bestimmten Wert von $0,016^\circ$ ist. Während Warren [137] und Bastos et al. [10] den gleichen Wert von $0,1^\circ$ vorschlagen, verweist Bastos et al. zusätzlich auf entsprechende Objekterkennungsalgorithmen. Keilaf von Innoviz [65] beschreibt die

Auflösung als den wichtigsten Leistungsparameter und definiert diese mit $0,05^\circ$ in vertikaler Richtung. Obwohl diese Zahl deutlich näher an dem Hergeleiteten liegt, besteht noch immer eine Diskrepanz vom Faktor ≈ 3 . Dieser Unterschied besteht deshalb, weil in dem White-Paper davon ausgegangen wird, dass es ausreicht einen schwarzen Reifen mit zwei Pixeln vertikal in einem Abstand von 100 m zu detektieren. Diese Annahme setzt allerdings voraus, dass ein Algorithmus mit dieser Anzahl von Pixeln robust funktioniert und dass ein Bremsweg von weniger als 100 m immer ausreichend ist. Diese Annahmen sind aus Sicht dieser Arbeit zu wenig restriktiv. Dai et al. [28] kommt auf Basis von Personengrößen zu Auflösungen von $0,04^\circ$, welche in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

Das FoV ist derjenige Leistungsparameter, der laut [104] von fast allen kommerziellen Sensoren schon jetzt am leichtesten erreicht wird. Während nach dieser Auflistung horizontal in den meisten Fällen mehr als 60° angegeben sind, können die meisten Systeme vertikal nur ein FoV von etwa 30° erzielen. In Hinsicht des FoVs geht aus [136] hervor, dass MEMS-Scanner mindestens eine FoV von 25° benötigen, um für selbstfahrende Fahrzeuge eingesetzt werden zu können. Auch dies stimmt mit den bestimmten Größen überein. Lediglich die Angaben von Bastos et al. [10] weichen von den hier gezeigten Ergebnissen ab, was vor allem daran liegt, dass die dort definierten Leistungsparameter für ein LiDAR oder eine Gruppe von LiDARen für das autonome Fahren im allgemeinen ausgelegt sind. Die dort beschriebenen $360^\circ \times 20^\circ$ für das FoV des Systems sind somit nur bedingt vergleichbar. Im Vergleich zu den Spezifikationen der Firma Innoviz [65] ist das hier beschriebene horizontale FoV von 41° größer, als die dort bestimmten 30° in der RoI. Das vertikale FoV in der RoI ist mit 10° und der Anpassung über $\pm 5^\circ$ sehr ähnlich zu dem oben hergeleiteten Wert von 12° . Dai et al. [28] kommt mit einem FoV von $32,6^\circ \times 10,2^\circ$ zu einem ähnlichen Ergebnis, was die Betrachtung bestätigt.

4.4.2 Bedeutung der Anforderungen für eine MEMS-Scaneinheit

Von den abgeleiteten Anforderungen für ein LiDAR-System sind letztlich nur eine Untergruppe für die Scaneinheit relevant. Diese setzt sich aus der Framerate, der Auflösung und dem FoV zusammen. Unabhängig von der detaillierten, technischen Gestaltung des Scanning-Mechanismus müssen diese drei Leistungsparameter gleichzeitig erfüllt werden damit das LiDAR funktionsfähig ist.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Auslegung und Vermessung von MEMS-Scanner. Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, stellen diese Art von Scanner - insbesondere in Hinblick auf LiDAR-Systeme - eine robuste, skalierbare und leistungsstarke Technologie dar.

FoV

Die Anforderung an das FoV lässt sich direkt auf die Scaneinheit anwenden, da dies die

Primärfunktion des Moduls ist. Demnach muss die MEMS-Einheit in der Lage sein, den Sichtbereich im definierten FoV von $41^\circ \times 12^\circ$ mit der definierten Auflösung abzutasten. Wie aus [104] hervorgeht, ist diese Art von Anforderung für ein MEMS-basiertes System schon jetzt auf dem Markt erhältlich. Dass MEMS-Scanner grundsätzlich geeignet sind, diese Ablenkwinkel zu erreichen, geht auch aus [136] hervor. Obwohl demnach einige MEMS-Scanner in zwei senkrecht zueinander stehenden Achsen ablenken können, ist zum Erreichen der Anforderung auch die Verwendung von zwei senkrecht zueinander stehenden Einheiten möglich. Dabei ist je eine für die horizontale und eine für die vertikale Ablenkung verantwortlich.

Framerate

Die Framerate des LiDARs ergibt sich aus der Zeit, die notwendig ist, um das gesamte spezifizierte FoV mit einer gewissen Scanauflösung zu vermessen. Demnach ist es essentiell, wie schnell eine MEMS-Einheit schwingt. Aufgrund der hohen Anforderung von $0,016^\circ$ an die Auflösung innerhalb des vertikalen FoVs von 12° müssten in der einfachsten Konstellation mit einem Messkanal demnach 750 Scanlinien gefahren werden. Im gleichen Zuge würde das bei einer System-Framerate von 15 Hz eine Scannerfrequenz von 5625 Hz bedeuten. Diese Berechnung folgt der nachfolgenden Gleichung 4.14.

$$f_{\text{MEMS}} = \frac{fps \cdot FoV_v}{2 \cdot \Delta\gamma \cdot n_{\text{Kanäle}}} \quad (4.14)$$

Hierbei ist f_{MEMS} die Scanfrequenz, in der zwei Scanlinien überstrichen werden, fps die Framerate des Systems, FoV_v das vertikale Sichtfeld des Systems, $\Delta\gamma$ die Auflösung des Systems und $n_{\text{Kanäle}}$ die Anzahl der Messkanäle, die gleichzeitig messen.

Obwohl es theoretisch einige erhältliche Scannermodule mit Frequenzen über 5625 Hz gibt, sind diese in der Praxis nur bedingt nützlich. Insbesondere bei monostatischen LiDAR-Systemen, bei denen Transmissions- und Empfangskanal gekoppelt sind, ist es entscheidend, dass sich der Spiegel während der gesamten Akquisition möglichst wenig weiterbewegt. Dies ist insbesondere deshalb ein Problem, da aufgrund der konstanten Lichtgeschwindigkeit eine minimale Zeit auf gestreute Photonen gewartet werden muss. Wird das Sichtfeld des Detektors entlang der Abtastrichtung zu klein gewählt, wird das Licht von Objekten in großem Abstand nicht mehr detektiert. Entscheidend ist in diesem Fall das Verhältnis der eindimensionalen Winkelausdehnung (in Scanrichtung) des Detektionspfads und des Transmissionspfads, welche im Weiteren als η bezeichnet wird. Die nachfolgende Abbildung 4.15 veranschaulicht diesen Zusammenhang für $\eta = 7$.

Im Moment der Emission bei $t = t_0$ würde das zurückgestreute Licht den Mittelpunkt des Detektors treffen. Die Bewegung des Scanners entlang des Azimuths führt dazu, dass

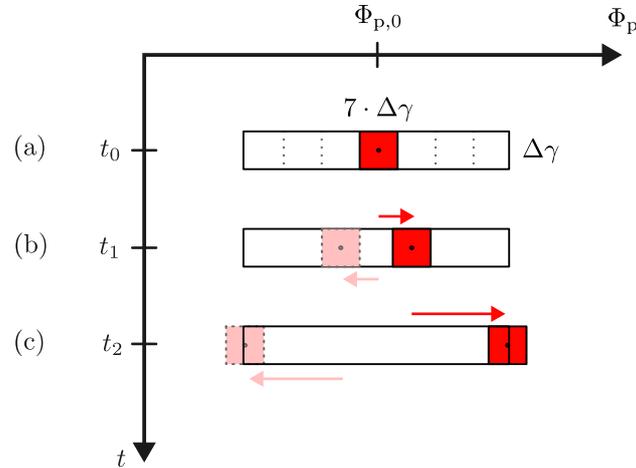


Abbildung 4.15: Schema des Sichtfelds des Detektors für $\eta = 7$ entlang des projizierten Azimut-Winkels Φ_p der Scannerabtastung für drei verschiedene Zeitpunkte nach der Emission des Laserpulses: (a) $t = t_0$, (b) $t = t_1$ und (c) $t = t_2$.

das zurückgestreute Licht auf einer anderen Stelle auf dem Detektor gemessen wird. Je nach Abtastrichtung sind beide Seiten möglich (Rot und Rosa für $t = t_1$). Für Objekte in größerem Abstand bei $t = t_2$ kann es dann dazu kommen, dass das Sichtfeld des Detektors verlassen wird.

Das Verhältnis η muss - insbesondere für schnelle Scanner - groß genug sein, damit gestreute Pulse während der gesamten Akquisitionszeit aufgezeichnet werden können. Große η führen allerdings auch zu folgender Problematik: Erreicht die Ablenkeinheit den nächsten Soll-Azimuth, muss ein Laserpuls ausgesandt werden, unabhängig davon, ob die vorherige Akquisition abgeschlossen ist. Ab $\eta \geq 3$ erfolgen Abstandmessungen dann nicht mehr nacheinander, was die Datenauswertung kompliziert macht. Eine technische Umsetzung, um diese Probleme zu lösen, ist die Verwendung von mehreren Transmissions- und Detektionspfaden gleichzeitig.

Bezogen auf einen resonant schwingenden MEMS-Scanner mit einer Maximalgeschwindigkeit von $\hat{\Phi} = \pi \cdot FoV_h \cdot f_{MEMS}$ lässt sich über die Größe des Transmissions- und des Detektionspfads Gleichung 4.15 als Anforderung für die Scannerfrequenz definieren.

$$f_{MEMS} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (\eta - 1) \cdot \Delta\gamma}{\frac{2 \cdot S_h}{c} \cdot \pi \cdot FoV_h} \quad (4.15)$$

In dieser Gleichung beschreibt η das Verhältnis der eindimensionalen Winkelausdehnung in

Scanrichtung des Detektionspfads zu dem Transmissionspfad. Die Auflösung des Systems ist beschrieben durch $\Delta\gamma$, die notwendige Reichweite als S_h und das erreichte horizontale FoV als FoV_h .

Werden beide Anforderungen aus Gleichung 4.14 und 4.15 gleichzeitig betrachtet, so gibt es für jedes η genau ein $n_{\text{Kanäle}}$ und damit eine f_{MEMS} , für die beide Bedingungen erfüllt werden. Die nachfolgende Tabelle 4.9 zeigt eine Übersicht für verschiedene Werte. Für alle weiteren Variablen sind die hier bestimmten Leistungsparameter aus Tabelle 4.8 verwendet worden.

Tabelle 4.9: Mögliche Scanfrequenzen für MEMS-Scanner für ein Langreichweiten-LiDAR.

η	$n_{\text{Kanäle}}$	f_{MEMS} in Hz
1.1	997	6
3.0	50	113
5.0	25	225
7.0	17	331
120.0	1	5625

Je kleiner die Überlagerung der Raumwinkel des Transmissions- und des Detektionspfads η , desto langsamer muss der Scanner schwingen und desto mehr Messkanäle müssen gleichzeitig aufzeichnen, um die erforderte Framerate zu erreichen. So ergibt sich z. B. bei $\eta = 1,1$ eine notwendige Kanalanzahl von 997, was eine maximale Scanfrequenz von 6 Hz ergeben würde. Diese Konfiguration eines Systems ist aus technischen und finanziellen Gründen nicht praktikabel: Zum einen würde die hohe Anzahl von Kanälen einen enormen Ausrichtungsaufwand während der Produktion bedeuten, zum anderen würden die Kosten für die Laser, die Detektoren und die Detektorelektronik dieses Produkt unrentabel machen. Wird das andere extrem aus der Tabelle 4.9 zugrunde gelegt, muss der Detektionspfad des Systems einen deutlich größeren Raumwinkel besitzen, als beleuchtet wird. Für den dargestellten Extremfall von $\eta = 120$ könnte mit einem Kanal und einer Scannfrequenz von 5625 Hz die Framerate des Systems erfüllt werden. Obwohl diese Konstellation aufgrund der geringen Kanalanzahl und der moderaten Scannerfrequenz technisch machbar ist, hätte ein großes η zur Folge, dass aufeinanderfolgende Akquisitionen den ausgesandten Pulsen zugeordnet werden müssen. Zusätzlich haben Streu- und Tageslicht einen sehr großen Einfluss auf das System, weshalb die Anforderung an die Reichweite bei Tageslicht nicht erreicht werden kann.

Als Kompromiss empfiehlt sich deshalb für ein monostatisches MEMS-System eine moderate Scannerfrequenz von einigen Hundert Herz. Eine denkbare Konfiguration wäre deshalb: $\eta = 5$, 25 Kanäle und eine Scanfrequenz von $f_{\text{MEMS}} = 225$ Hz. Da $\eta \geq 3$, müsste auch für ein solches System eine Methode gefunden werden, um aufeinanderfolgende Akquisitionen

voneinander unterscheiden zu können. Hierfür wären Pulskodierungen oder Detektor-Arrays denkbar.

Auflösung

Zum Erreichen einer definierten Abtastauflösung des Sensors ist das Zusammenspiel aus der Laserfrequenz und der Scangeschwindigkeit von Relevanz. Um in der gewünschten Auflösung zu pulsen, muss die Ablenkung und damit die rotatorische Bewegung des Scanners bekannt sein und geregelt werden. Die Oszillation der Ablenkeinheit muss kontinuierlich sein und darf im Betrieb nicht springen.

Insbesondere MEMS-Scanner sind für diese Art der Ablenkung gut geeignet, da diese in den meisten Fällen in Resonanz betrieben werden und somit eine kontinuierliche harmonische Schwingung ausführen. Die Auflösung des Systems ist demnach hauptsächlich durch die Genauigkeit der Ansteuerung definiert.

Reichweite

Wie aus Gleichung 3.4 hervorgeht, ist die notwendige Reichweite eines LiDARs direkt von der Detektorapertur abhängig. Diese ist bei monostatischen Systemen meist durch die Scanner gegeben. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn MEMS-Scanner verwendet werden, die aufgrund ihrer Technologie kleine Durchmesser von wenigen Millimetern besitzen [136]. Deshalb muss der Durchmesser der Scanner so gewählt werden, dass bei maximal zulässiger, augensicherer Laserpulsenergie die geforderte Range des Systems erreicht werden kann. Außerdem muss die Größe zu der oben abgeleiteten Scannerfrequenz passen. Da die Größe und genau Form des Scanners ein technisches Detail ist, das beliebig gestaltet werden kann und dieser Faktor für die Vermessung zunächst nebensächlich ist, wird auf die Größe der Scannerapertur nicht weiter eingegangen.

4.4.3 Anforderungen für ein Messsystem einer Scaneinheit

Aus den abgeleiteten Anforderungen für das System aus Kapitel 4.4 und für einen einzelnen MEMS-Scanner aus Kapitel 4.4.2 lässt sich eine notwendige Spezifikation für ein Messsystem bestimmen. Konzeptionell betrachtet muss das Messsystem dabei in der Lage sein, den Ablenkwinkel der Scaneinheit zeitaufgelöst aufzunehmen. Diese Daten sollen dazu verwendet werden, den Scanner zu charakterisieren und in einem zweiten Schritt so zu kontrollieren, dass dieser gemäß den gegebenen Anforderungen schwingt. Dieses Kapitel fasst die resultierenden Anforderungen zusammen.

Messung des Ablenkwinkels

Die genaue Vermessung des Ablenkwinkels des LiDAR-Scanners ist der Kern des Messsystems. Aus diesem Grund muss es in der Lage sein, den gesamten Scanbereich, der

durch das FoV gegeben ist, aufzunehmen. Nachdem das horizontale FoV mit 41° eine anspruchsvollere Messung darstellt, lässt sich dieser Wert als Mindestanforderung an den Winkelmessbereich stellen.

Aufgrund der anspruchsvollen Anforderung an die Auflösung des LiDARs von $\Delta\gamma = 0,016^\circ$ ist insbesondere die Auflösung der Winkelmessung relevant. Diese sollte mindestens um einen Faktor 2 besser sein als die geforderten $0,016^\circ$.

Die absolute Genauigkeit dieser Winkelmessung ist dabei weniger relevant, da für das Scanning im System relativ und nicht absolut gepulst wird. Solange demnach die Scanauflösung zwischen zwei benachbarten Akquisitionen erreicht werden kann, ist ein absoluter Ablenkwinkelfehler nicht limitierend.

Bandbreite und Abtastrate

Die oben beschriebene Messung des Ablenkwinkels muss aufgrund der Geschwindigkeit und damit der Frequenz des Scanners für die Einhaltung der LiDAR-Auflösung mit einer hohen zeitlichen Auflösung bestimmt werden. Es wird von einer resonanten Schwingung mit einer Eigenfrequenz von ca. 225 Hz ausgegangen (4.4.2). Um das Signal korrekt rekonstruieren zu können, muss die Bandbreite so gewählt werden, dass auch höhere Ordnungen der Schwingungen noch detektiert werden können. Ein Faktor $\times 10$ ist dafür ausreichend. Die Abtastrate ist nach Nyquist-Theorem mindestens doppelt so groß zu wählen. Für die beschriebene Scannerfrequenz ergibt sich so eine Bandbreite von mindestens 2250 Hz bei einer Abtastrate von mindestens 4500 Hz.

Sonstige Anforderungen

Zunächst muss die Messung möglichst automatisch und schnell geschehen, ohne dass ein Produktionsarbeiter eine lange manuelle Kalibrierung oder Ausrichtung vornehmen muss. Das System sollte zudem möglichst kompakt sein und insbesondere keine Gefahr für den Bediener bedeuten.

Kapitel 5

Messstand für MEMS-Scaneinheiten

Die Scaneinheit ist technologisch die neueste Komponente in moderner 3D-LiDAR-Sensoren. Während die Reichweitenbestimmung (Ranging) bereits in vielen anderen Bereichen optimiert wurde, birgt die Abtastung - insbesondere aufgrund der hohen Anforderung - die größten Herausforderungen. Aus diesem Grund beschäftigt sich dieses Kapitel mit dem Stand der Technik, der Entwicklung, dem Aufbau, der Kalibrierung und der Validierung eines Prüfstands zur schnellen und effizienten Vermessung des dynamischen Schwingverhaltens einzelner MEMS-Scaneinheiten für LiDAR-Anwendungen.

Die Inhalte und Ergebnisse dieses Kapitels beruhen auf einem erweiterten Datensatz der Originalveröffentlichung [149]. Diese Arbeit beschreibt die Ergebnisse im Detail, diskutiert Abweichungen und Unsicherheiten und stellt diese in Kontext zu den oben erhobenen Anforderungen.

5.1 Stand der Technik

Zunächst soll aufgezeigt werden, wie LiDAR-Systeme und im besonderen MEMS-Scanner nach aktuellem Stand der Technik vermessen werden. Hierbei wird auf die Notwendigkeit und Methoden zur Kalibrierung von LiDAR-Sensoren eingegangen. In den darauf folgenden Kapiteln ist beschrieben, welche Möglichkeiten zur Vermessung von Ablenkwinkeln bestehen und letztlich wie diese heutzutage mittels positionsempfindlichen Dioden bzw. Detektoren (PSDs) vermessen werden können.

5.1.1 Kalibrierung und Vermessung von LiDAR-Systemen

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, sind 3D-LiDAR-Sensoren komplexe Messinstrumente, die eine Vielzahl von oftmals beweglichen Komponenten aufweisen. Die generierte Punktwolke

beinhaltet die lokalen Koordinaten jeder einzelnen Abstandsmessung an vorhandenen Objekten. Wird ein solcher LiDAR auf einem Fahrzeug montiert oder zusätzlich durch andere, externe Motoren in seiner Position aktiv verstellt, wie es bei Scheinwerfern der Fall ist, so muss die globale Position des Sensors zu der realen Welt kalibriert werden. Für einfache Anwendungen, wie stationäre Installationen (auch auf einem Fahrzeug), bieten viele Hersteller Koordinatentransformationen an. Ein Beispiel hierfür ist die Untersuchung von Gao et al. [45], die die Einbau-Orientierungsparameter eines 2D-LiDARs auf einem Motor durch das Scannen einer Ebene (Wand) hervorbringt, um ein kostengünstiges 3D-LiDAR aufzubauen. Ähnlich dazu werden auch bei 3D-LiDAR-Systemen einfache Geometrien, wie Ebenen, Kanten, Kugeln oder Quader in den Punktwolken detektiert und analysiert, um die relative Position des Sensors zu der „echten“, globalen Welt zu bestimmen. Ist eine Landmarke erkannt, so kann der Prozess auf die Bestimmung weniger Optimierungsparameter beschränkt werden, wie in [45] gezeigt ist. Auf ähnliche Art und Weise gelang es in [6] auch einen scannenden 3D-LiDAR der Firma Velodyne (HDL-64E), mittels fünf Flächen zu kalibrieren. Es zeigt sich, dass Software-Algorithmen zum jetzigen Stand der Technik die Lage und Orientierung eines 3D-LiDARs aus der Punktwolke bestimmen können.

5.1.2 Vermessung von Ablenk winkeln

Als komplexer erweist sich die Kalibrierung bzw. Vermessung des LiDAR-Sensors auf der Seite des Herstellers. Für scannende Systeme bezieht sich dies insbesondere auf die Abtastung. Abhängig von der Art des Scannens, ist diese Funktionalität aufgrund der Orientierung mehrere Einheiten und unter Umständen nicht-linearen, mehrdimensionalen Bewegungen komplex. Den Grundstein bildet die Regelung einer einzelnen Ablenkeinheit, weshalb sich hierauf konzentriert wird. Im Folgenden beschreibt das Kapitel vier verschiedene Ansätze zur optischen Vermessung von Ablenk winkeln.

Manuelle, geometrische Vermessung

In der einfachsten Form erfolgt die Messung eines Ablenk winkels geometrisch. Über die genaue Position des Auftreffpunktes auf dem Spiegel und des Auftreffpunktes auf einer Ebene in bekanntem Abstand kann so über die Funktion des Tangens ein Winkel berechnet werden. Je größer der Abstand gewählt wird, desto genauer kann ein Ablenk winkel bei gleicher Positionsaufösung bestimmt werden. Dies liegt daran, dass kleine Positionsänderungen in großer Entfernung einer kleinen Winkeländerung entsprechen.

Die Durchführung erfolgt abhängig von der Größenordnung über Abstandsmessungen mittels Messschiebern, Maßstäben, Maßbändern oder optischen Abstandsmessgeräten [101]. Ein Beispiel für ein solches Vorgehen findet sich in der Veröffentlichung [44], die

Ablenkwinkel eines Messsensors durch eine geometrische Vermessung an einem Schirm validiert.

Automatisierte, geometrische Vermessung

Zur Automatisierung des Messprozesses können optische Sensoren als Messfläche verwendet werden. Abbildung 5.1 zeigt zwei Sensorkonzepte, die neben klassischen pixel-basierten Kamerasensoren existieren.

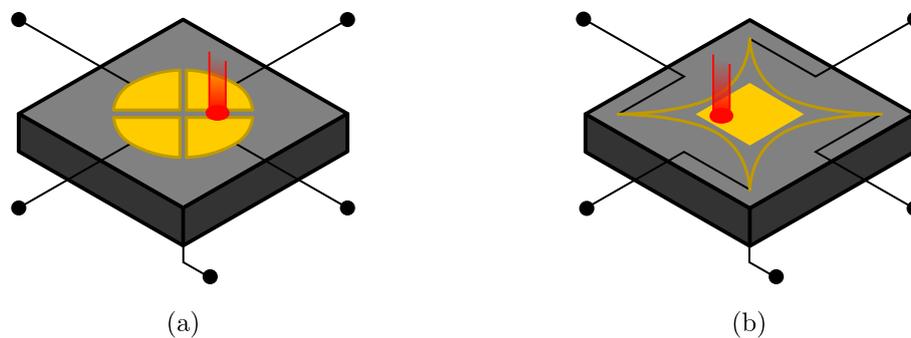


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau der verschiedenen Sensortypen basierend auf [121]: (a) Quadrantenphotodiode und (b) laterale PSD.

Eine Alternative zu klassischen Kamerasensoren sind analoge, positionempfindliche Sensoren. Dazu zählen sogenannte Quadrantenphotodioden und laterale PSDs (Position Sensitive Detector oder Position Sensitive Diode). Sie finden sich in Abbildung 5.1. Quadrantenphotodioden [5] sind aus vier nebeneinander liegenden Photodioden aufgebaut, welche in einem Abstand von ca. 1 mm positioniert sind. Trifft ein Laser den Detektor, so entstehen vier Ströme mit einer Stromstärke proportional zu der Leistung des Eintrags des partiellen Lasers. Aus dem Verhältnis der vier Ströme kann somit die Position des Laserspots auf dem Sensor bestimmt werden. Diese Art von Sensor wird hauptsächlich für die Ausrichtung von Lasern in der Forschung verwendet [121]. Sie findet sich aber auch zur Bestimmung des Einfallswinkels von Licht [24]. Diese Art von Sensor ist für Gaußstrahlen ausgelegt und aufgrund der Konfiguration auch nur in bestimmten Größen erhältlich.

Laterale PSDs arbeiten nach einem ähnlichen Prinzip: Es handelt sich um PIN-Photodioden mit einer schwach-leitenden (resistiven) Schicht auf der Oberseite. Trifft ein Laser auf den Sensor, so entstehen zwei Ströme, deren Stromstärke proportional zur Auftreffposition des Leistungsschwerpunkts sind. Aus dem Verhältnis der Ströme lässt sich die Position bestimmen. Auf laterale PSDs wird genauer im Kapitel 5.1.3 eingegangen. Neben der Anwendung für die Vermessung von Ablenkwinkeln, finden sich laterale PSDs für die

Vermessung von Architekturveränderungen [77], für Auto-Fokus-Beobachtungen [21] und für Rasterkraftmikroskope [96]. Laterale PSDs bieten aufgrund hoher Bandbreiten und großer Sensorflächen große Flexibilität.

Abbildende, automatisierte und geometrische Vermessung

Um größere Ablenkwinkel oder Scanner mit großen Aperturen vermessen zu können, kann die geometrische Bestimmung ebenfalls über eine optische Abbildung eines Zwischenbildes erfolgen. Als Technologie können CMOS oder CCD-Kameras eingesetzt werden, welche in der Lage sind, die Auftreffpunkte auf der Ebene optisch abzubilden und je nach Framerate der Kamera zeitlich, automatisiert aufzunehmen. Mittels der bekannten Kamera-Kalibrierung nach Zhang [146], welche in Kapitel 5.3 weiter diskutiert wird, lässt sich sicherstellen, dass die Abbildung keine negativen Einflüsse auf die Genauigkeit des Systems hat. Im Vergleich zu kommerziellen Kameras, die eine Framerate von bis zu 60 Hz ermöglichen, arbeiten Hochgeschwindigkeits-Kameras mit Frameraten von 11000 Hz bis 2100000 Hz [94], was in Anbetracht der Anforderungen für die Vermessung von MEMS-Scannern ausreichend ist.

Ebenso finden sich Forschungsergebnisse zu Anwendungen von lateralen PSDs, welche die Position von Lichtquellen wie LEDs mithilfe von Linsen auf den Sensor abbilden [103, 109].

Eine weitere Abwandlung kann theoretisch dadurch erzeugt werden, dass die Messebene verändert wird. Die beschriebene „weiße Wand“ ist physikalisch im optimalen Fall ein Lambertscher Strahler, welcher sich dadurch auszeichnet, dass die einfallende Lichtleistung mit konstanter Strahldichte der Fläche in den Halbraum abstrahlt. Praktisch werden hierfür Diffusoren mit vielen Streuzentren verwendet. Transmissive Diffusoren erlauben die Betrachtung des Scanners von der gegenüberliegenden Seite der Scaneinheit und erleichtern den Aufbau des Systems.

Alternativ könnte theoretisch auch ein Aufbau nach dem Konzept der „Imaging Sphere“ verwendet werden, bei welcher ein hemisphärischer Schirm mithilfe eines gekrümmten Spiegels auf einen Kamerasensor abgebildet wird [106].

Konoskope

Ein letztes Verfahren zur Bestimmung von Ablenk winkeln ist die Verwendung von sogenannten Konoskopen [25]. Dabei handelt es sich um ein optisches System, das eine Transformation des Winkelraums in den Objektraum ermöglicht. Das Konzept bildet dazu die Fourier-Ebene auf einen optischen Sensor ab. Technisch befindet sich deshalb die Sensorebene in der Brennebene des verwendeten Objektivs. Da alle Linsen Abbildungsfehler, wie Bildfeldkrümmung und Verzeichnung aufweisen, ist für diese Art der optischen Abbildung eine Vielzahl von Linsen notwendig. Theoretisch kann für die hier beschriebene

Anwendung eine F-Theta-Linse verwendet werden, praktisch ist die Bildebene allerdings durch die Größe des Sensors limitiert. Abbildung 5.2 zeigt den Aufbau schematisch ([33] abgeändert).

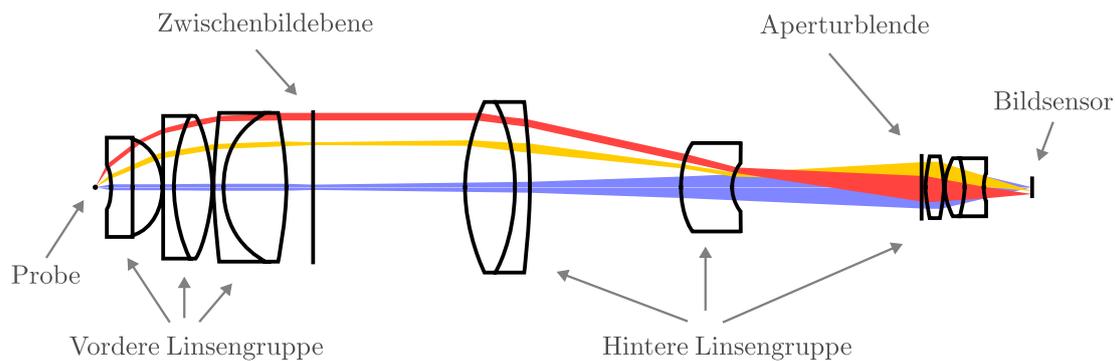


Abbildung 5.2: Schematischer Aufbau eines Konoskops ([33] übersetzt und Anzahl der Strahlen reduziert).

5.1.3 Verwendung von positions sensitiven Detektoren

Nachdem die Verwendung von lateralen PSDs im letzten Kapitel 5.1.2 aufgezeigt wurde, soll in diesem Kapitel beschrieben werden, wie diese Sensoren funktionieren, aufgebaut sind und wie sich die Position eines Lasers bestimmen lässt. Ferner wird dargestellt, wie diese Art von Sensor in der Forschung für die Vermessung von Ablenkwinkeln eingesetzt worden ist. Der Begriff PSD wird im Folgenden für laterale PSDs verwendet.

5.1.3.1 Theoretischer Hintergrund zu positions sensitiven Detektoren

Dieses Kapitel stellt die Grundlagen, die Berechnung und die Limitationen des Detektors dar.

Grundlagen

PSDs sind vielfach verwendete Sensoren, um die Position eines Laserspots zu vermessen. Die Anwendung wurde erstmals 1957 in „A New Semiconductor Photocell Using Lateral Photoeffect“ von Wallmark beschrieben [135]. Dieser diskutiert darin im Detail, wie eine nicht-homogene Ausleuchtung einer p-n Photodiode zwei laterale Ströme erzeugt, deren Größe linear proportional zur Position des Auftreffpunkts ist und wie deren Bestimmung erfolgt.

Der aktuelle Stand der Technik verwendet für PSDs spezielle PIN-Halbleiter-Übergänge, die

auf ihrer Oberfläche einen konstanten Flächenwiderstand aufweisen und an ihren Enden durch elektrische Kontakte begrenzt sind. Anstelle der für PIN-Photodioden üblichen zwei Anschlüsse für Kathode und Anode, finden sich bei PSDs mindestens drei.

Neben eindimensionalen PSDs sind kommerziell auch zweidimensionale Varianten erhältlich, die es ermöglichen, den Schwerpunkt einer Lichtverteilung in einer Ebene zu lokalisieren. Die besondere Anordnung der Kathode ermöglicht so die Detektion von vier Strömen, die gleichmäßig, in einem Winkel von je 90° zueinander, über die Fläche der PSD verteilt sind. Dabei haben sich zwei Arten durchgesetzt: duo-lateral und tetra-lateral (siehe Abbildung 5.3).

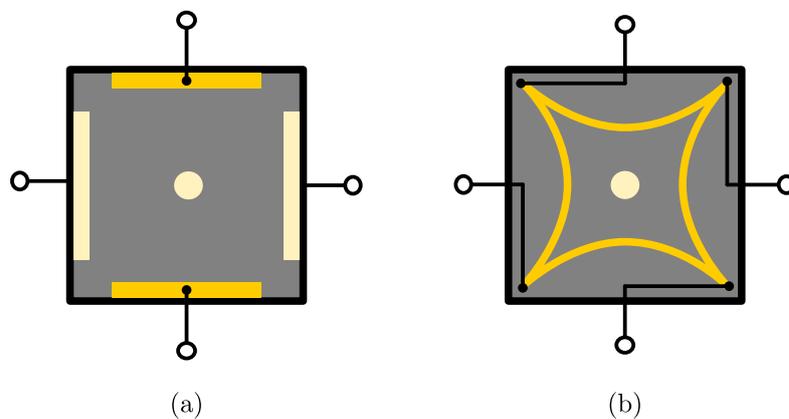


Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau von zweidimensionalen PSDs:(a) duo-lateral, (b) tetra-lateral in der Konfiguration „pin-cushin“.

Wie aus Abbildung 5.3 hervor geht, unterscheiden sich die beiden zweidimensionalen Sensortypen nur durch die Anordnung der Elektroden. Bei der duo-lateralen (a) Version, 1975 theoretisch analysiert von Woltring [140], befinden sich je zwei Elektroden auf gegenüberliegenden Seiten auf der Ober- und Unterseite des Detektors. Die Kathoden auf der Unterseite befinden sich auf Achse, die zur oberen Anordnung um 90° gedreht ist. Somit wird je eine Komponente der Position auf der Ober- und Unterseite gemessen.

Im Vergleich dazu besitzen tetra-laterale PSDs insgesamt fünf Elektroden, vier auf der Oberseite und eine auf der Unterseite. Die Anoden auf der Oberseite befinden sich an je einer Kante des Sensors. Um die in den Ecken entstehende Verzeichnung zu minimieren, werden die Anoden (ähnlich zu der Form eines Kissens) nach innen gebogen, was z.B durch von Doke et al. 1987 technisch gezeigt wurde [29]. Diese Konfiguration wird demnach „pin-cushin“ genannt und ist in (b) aus Abbildung 5.3 dargestellt.

Duo-laterale PSDs zeichnen sich durch höhere Ströme und kleine Verzeichnungen aus,

während tetra-laterale pin-cushin PSDs kleine Dunkelströme, ein einfaches Anbringen von Vorspannungen und schnellere Antwortzeiten bieten [49].

Die weitere Diskussion konzentriert sich auf PSDs vom tetra-lateralen pin-cushin Typ. Der Zusammenhang zwischen den vier erzeugten Strömen und der Position des Lasers auf dem Detektor ist nach [49] durch die Gleichungen 5.1 und 5.2 gegeben.

$$\frac{(I_{u2} + I_{v1}) - (I_{u1} + I_{v2})}{\sum I} = \frac{2 \cdot u}{L_u} \quad (5.1)$$

$$\frac{(I_{u2} + I_{v2}) - (I_{u1} + I_{v1})}{\sum I} = \frac{2 \cdot v}{L_v} \quad (5.2)$$

Demnach lässt sich das Verhältnis aus der Position u bzw. v zu der jeweiligen Länge der aktiven Fläche L_u und L_v aus den Einzelströmen I bestimmen. Ströme mit dem Index u verlaufen dabei entlang der Länge L_u und Ströme mit dem Index v entlang L_v . Die Indizes 1 und 2 stehen jeweils für gegenüberliegende Seiten des Detektors.

Anwendungsspezifische Berechnung

PSDs sind in vielen Varianten als einfacher Sensor erhältlich, werden aber auch als Modul mit integrierter Elektronik verkauft. Für die meisten Anwendungen ist es nötig, eine Spannung einzulesen, weshalb viele Anbieter die erzeugten Photoströme mit Transimpedanzverstärkern (TIA) in Spannungen wandeln. Ein Beispiel hierfür ist das Modul mit der Bezeichnung PDP90A von Thorlabs [124]. Diese gibt drei Spannungen aus: je eine für die horizontale und vertikale Position und eine für die Summenspannung. Dies erfolgt analog zu den Gleichungen 5.1 und 5.2. Für quadratische PSDs errechnet sich die Position eines Lasers auf der PSD in Vektorform nach Gleichung 5.3.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{L_{\text{PSD}}}{2 \cdot U_{\text{Summe}}} \cdot \begin{bmatrix} U_u \\ U_v \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Die horizontale Position u und die vertikale Position v lassen sich somit aus dem Verhältnis der PSD-Kantenlänge L_{PSD} und der Summenspannung U_{Summe} durch Multiplikation mit den individuellen Spannungen U_u und U_v berechnen. Die Summenspannung U_{Summe} ist direkt proportional zu der einfallenden Laserleistung.

Einschränkungen

Ähnlich zu abbildenden optischen Systemen kommt es auch in PSDs zu Verzeichnungen. Je nach Typ, Größe und Hersteller der PSD fällt dieser Effekt unterschiedlich aus. Grundsätz-

lich sind duo-laterale PSDs weniger betroffen als tetra-laterale PSDs. Ein Beispiel hierfür liefert die Forschung von Solal, welche die Verzeichnung einer duo-lateralen PSD modelliert und mit experimentellen Ergebnissen verifiziert [115]. Die Verzeichnung wird in allen Fällen stärker, je größer der Abstand zum Zentrum ist, da sich z. B. bei tetra-lateralen PSDs Anoden zweier benachbarten Kanten beeinflussen. Eine externe Kalibrierung mit dem Modell für die Verzeichnungskorrektur von Kameras kann diese Eigenschaft minimieren [103].

Die generierten Ströme der PSD unterliegen nach [49] (bei eindimensionalen PSDs) drei verschiedenen Rauscharten: Shot-Rauschen, thermisches Rauschen und äquivalentes Eingangsrauschen des Operationsverstärkers. Für tetra-laterale PSDs der Firma Thorlabs [124] errechnet sich die Auflösung des Sensors als:

$$\Delta R = L_x \left(\frac{e_n}{U_{\text{Summe}}} \right), \quad (5.4)$$

wobei L_x die Kantenlänge der PSD entlang einer Achse, ΔR die Positionsauflösung entlang einer Achse, e_n die Ausgangs-Rauschspannung des Sensors und U_{Summe} die Summenspannung ist. Die Symbole wurden angepasst. Für den dort beschriebenen Sensor mit der Bezeichnung PDP90A errechnet sich für deren spezifizierte Anwendung eine Auflösung von $0,75 \mu\text{m}$.

Laterale PSDs sind in ihrer Dynamik sowohl zeitlich als auch örtlich beschränkt. Gründe hierfür sind die parasitäre Kapazität als auch durch die verwendete Ausleseelektronik (insbesondere den Transimpedanzverstärker). Viele Forschungen haben sich deshalb mit der Modellierung und Simulation des transienten, nicht statischen Falls beschäftigt [68, 111]. In diesem Zusammenhang soll auf die Forschung von Shang [111] Bezug genommen werden, welche durch Simulation zu dem Ergebnis kommt, dass die Bewegung von Licht-Spots auf dem Sensor bis zu einer Geschwindigkeit von $104,72 \text{ m s}^{-1}$ korrekt mit einer eindimensionalen PSD aufgezeichnet werden kann. Umgerechnet entspricht diese Geschwindigkeit in etwa $\frac{10,5 \text{ mm}}{100 \mu\text{s}}$. Ein Überstreichen einer PSD mit einer Kantenlänge von $10,5 \text{ mm}$ muss demnach länger als $100 \mu\text{s}$ dauern und somit mit einer Frequenz kleiner 10 kHz geschehen.

5.1.3.2 Einsatz von PSDs zur Vermessung von Ablenk winkeln

Die Verwendung von lateralen PSDs (hier: PSD) zur Vermessung von Ablenk winkeln sind in der Literatur häufig zu finden. Dieses Kapitel gibt einen Einblick in die wichtigsten Ergebnisse.

Mithilfe von vier LEDs, einer Linse und einer zweidimensionalen PSD waren Kento und Kenji Nishibori in der Lage, den Anstiegswinkel und die Distanz eines Spiegels zu dem

Messaufbau zu bestimmen [85]. Der Messbereich betrug dabei $\pm 8^\circ$ mit einer Messunsicherheit von $0,5^\circ$. Für einen Autokollimator verwendete Zhang et al. eine zweidimensionale PSD für dynamische Messungen von kleinen Winkeln [145]. Für verschiedene Spiegelwinkel und Drehgeschwindigkeiten konnten hier Messungenauigkeiten von $1,9'' (\approx 0,3^\circ)$ über einen Messbereich von $400'' (\approx 6,7^\circ)$ erreicht werden. In [44] zeigte Fujita et al. ein Messsystem basierend auf einer zweidimensionalen PSD mit einem Loch im Zentrum zur dynamischen Vermessung des Ablenkungswinkels eines MEMS-Scanners. Hierbei konnte eine Messunsicherheit mit einem RMS-Fehler von $0,21^\circ$ bei einem maximalen Messbereich von $\pm 6^\circ$ erreicht werden. Letztlich ist die Veröffentlichung [141] von Yoo et al. zu erwähnen. Darin untersucht die Gruppe die dynamische Vermessung der Ablenkungswinkel eines MEMS-Scanners mithilfe einer zweidimensionalen PSD, eines Sechs-Achsen-Positioniertisches und eines axialen Lineartisches. Ablenkungswinkel konnten mit einer Messgenauigkeit von $0,026^\circ$ bei Auslenkungen von bis zu 15° bestimmt werden. Diese Veröffentlichungen sind ein Zeichen dafür, dass die dynamische Vermessung und Charakterisierung von MEMS-Scannern mithilfe von PSDs möglich ist und zugleich hohe Genauigkeiten erreicht.

5.2 Messmethodik

Das folgende Kapitel zeigt den generellen Aufbau des Systems, die Funktionsweise und neuartige intrinsische Kalibrationsmethodik.

5.2.1 Messprinzip und -aufbau

Ähnlich zu [141] beruht der Kern des Messsystems auf der Bestimmung der Position eines Laserspots auf einer zweidimensionalen PSD. Anstelle die PSD direkt mit dem abgelenkten Strahl zu beleuchten, wird die PSD ähnlich zu einer Kamera verwendet: Sie betrachtet den abgelenkten Laserspot auf einem Schirm. In diesen Fall wird dies durch einen transparenten Diffuser erreicht, welcher somit aus der eigentlichen Winkelmessung eine direkte Positionsmessung macht. Abbildung 5.4 zeigt den Aufbau schematisch.

Der Aufbau der Vermessung ist in zwei Bereiche geteilt: der Laserpfad (a) und der Detektionseinheit (b). Dem Strahlengang folgend wird der Laserstrahl mit einem CW-Laser (RLDH980-200-3, Roithner Lasertechnik GmbH) erzeugt und kollimiert. Die Ausgangsleistung beträgt ca. 200 mW bei einer Wellenlänge von (980 nm). Der Laserstrahl wird über zwei Spiegel räumlich so ausgerichtet, dass dieser den MEMS-Scanner mittig in einem Winkel parallel zu den Aufbauachsen trifft. Der Scanner, welcher in einer präzisen Mechanikhalterung befestigt ist, lenkt den Strahl auf den Detektionsschirm ab.

Der Schirm ist ein transmissiver Diffusor (200 x 200 mm, breitbandiger Hybrid-Diffusor, # 36619, Edmund Optics Inc) mit lambertscher Abstrahlcharakteristik. Mithilfe einer

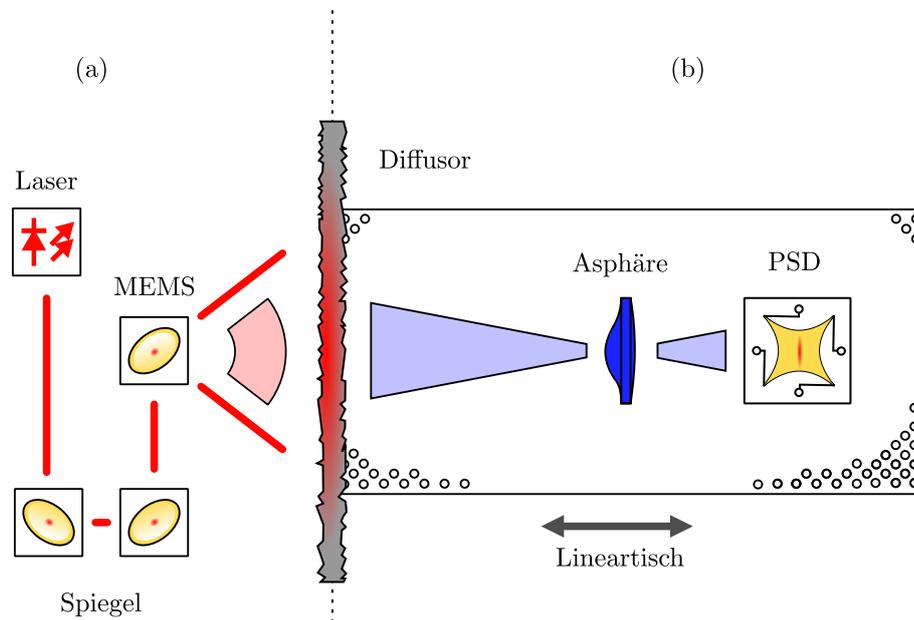


Abbildung 5.4: Schematischer Aufbau des Messsystems mit dem Laserpfad (a) und dem Detektorpfad (b) (basierend auf [149]).

asphärischen Linse (A240TM-B, Thorlabs GmbH) mit einer Brennweite von 8 mm wird der auf dem Schirm erzeugte Laserspot auf die PSD (PDP90A, Thorlabs GmbH) abgebildet. Das PSD-Modul besitzt eine Kantenlänge von 10 mm bei einer aktiven Fläche von $9,1 \text{ mm} \times 9,1 \text{ mm}$ und einer Bandbreite von 15 kHz. Die drei Ausgangsspannungen werden mithilfe eines Oszilloskops (RTB2004, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG) aufgezeichnet und nach der Messung verarbeitet.

Die Besonderheit des Systems liegt in der Verwendung eines Lineartisches (MTS25/M-Z8, Thorlabs GmbH) mit einem Verfahrweg von 25 mm zur Verstellung der Distanz zwischen dem Laser- und dem Detektorpfad. Dies ermöglicht eine In-situ Kalibrierung der genauen Spiegelposition relativ zu dem Detektorpfad. Die Methodik ist als RTST von „Ray Trace Shifting Technique“ bezeichnet, mithilfe welcher der Strahlengang rekonstruiert werden kann. Auf die genaue Bedeutung und die Verwendung wird in Kapitel 5.2.2 eingegangen. Die nachfolgende Abbildung 5.5 zeigt ein Foto des Prüfstands in der Draufsicht.

5.2.2 Berechnung des Ablenkwinkels

Die durch Gleichung 5.3 aus den Ausgangsspannungen berechnete PSD-Position wird mithilfe der statischen Kalibration der PSD-Kamera auf Schirmkoordinaten transformiert (siehe Kapitel 5.3). Die bestimmte Schirmposition wird dann dazu verwendet, um über

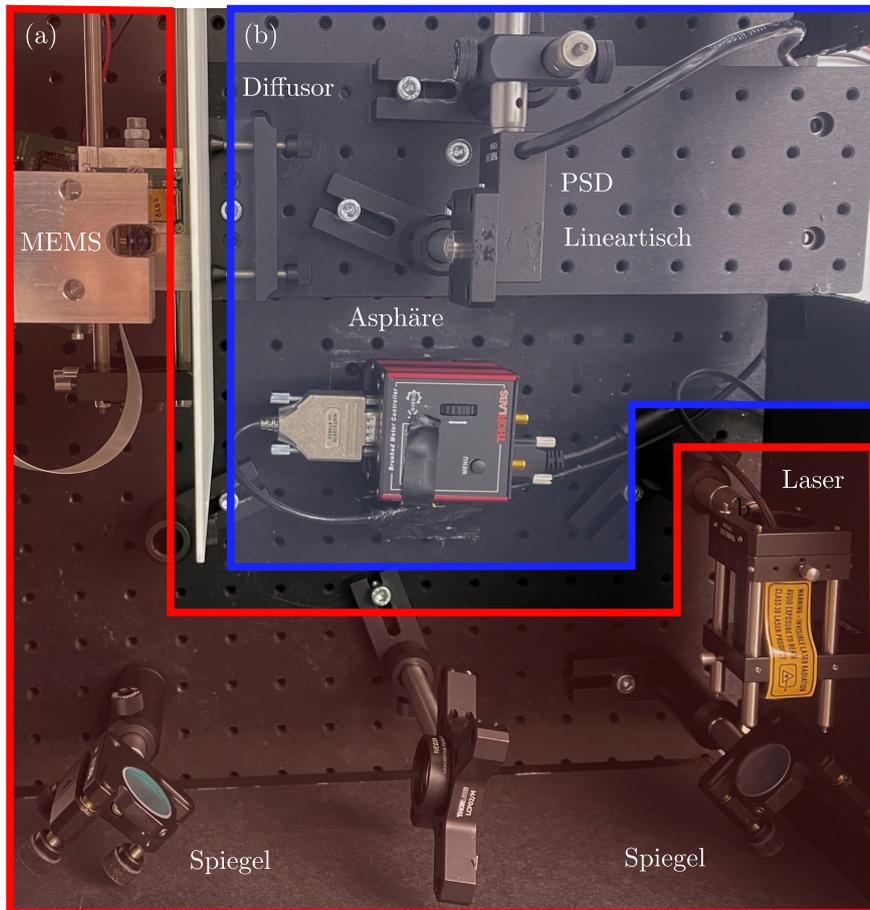


Abbildung 5.5: Foto des Prüfstands mit dem Laserpfad (a) und dem Detektorpfad (b) (basierend auf [149]).

die Position des Scanners durch Trigonometrie, den Spiegelwinkel zu berechnen. Der Zusammenhang ergibt sich im einfachsten Fall (für senkrechten Einfall) nach Gleichung 5.5.

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{X(t)}{d}\right) \quad (5.5)$$

Der zeitabhängige Ablenkwinkel $\theta(t)$ errechnet sich demnach über die Arkustangensfunktion aus dem Bruch der horizontalen zeitabhängigen Schirmposition $X(t)$ und dem Abstand d zwischen der Scaneinheit und dem Schirm.

Die Tatsache, dass die eingesetzten Scaneinheiten immer Aufbau- und auch Einbautoleranzen besitzen, führt dazu, dass der Zusammenhang aus Gleichung 5.5 keine ausreichende Beschreibung des Systems ist. Für die Berechnung muss deshalb für jede Scaneinheit die Positions- und Winkelabweichung in der horizontalen Ebene bestimmt werden. Dafür ist

ein Konzept der In-situ Kalibrierung entwickelt worden, welches hier mit RTST („Ray Trace Shifting Technique“) abgekürzt wird.

Das Konzept beruht darauf, dass der Scanner in seiner Resonanzschwingung in jeder Periode annähernd gleich schwingt. Wird der Abstand zwischen der Scaneinheit und dem Schirm verfahren, so kann der gleiche Ablenkwinkel an einer anderen Schirmposition bestimmt werden. Wird dies für viele Abstände durchgeführt, so können einzelne Ablenkstrahlen für bestimmte Zeitpunkte rekonstruiert werden. Die nachfolgende Abbildung 5.6 stellt schematisch dar, wie diese Rekonstruktion funktioniert und wie die mathematische Nomenklatur ist.

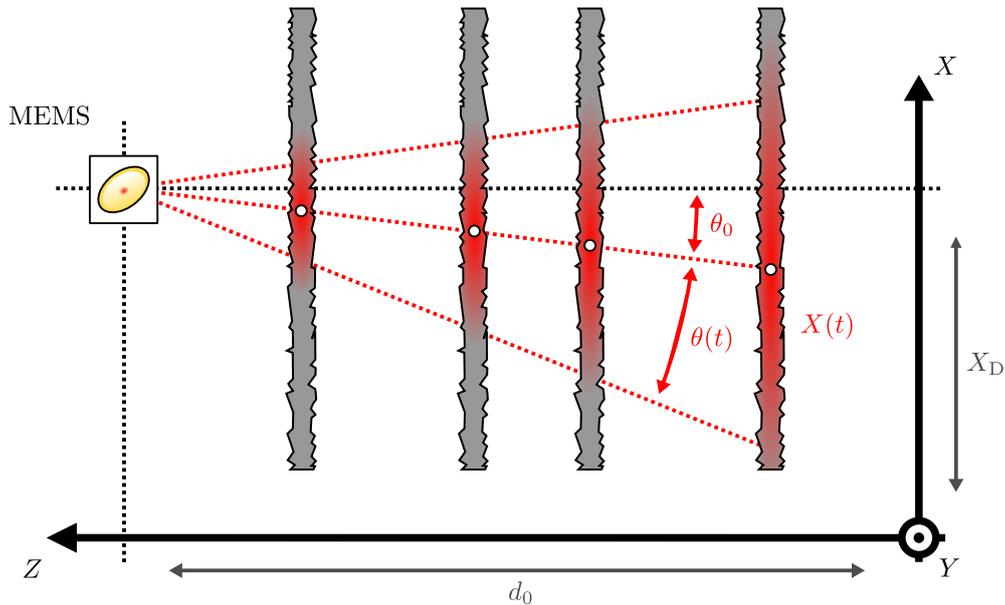


Abbildung 5.6: Konzept zur Berechnung des Ablenkwinkels mittels RTST (basierend auf [149]).

Die Schwingung des MEMS-Scanners (links) spannt über eine gewisse Zeit hinweg, ein festes FoV auf (rot). Für feste Zeitpunkte lassen sich einzelne, abgelenkte Strahlen markieren (gestrichelte Linien), die den Schirm je nach Abstand an einer anderen Position treffen (weiße Punkte). Durch Kenntnis des jeweiligen Abstands lassen sich so aus den Auftreffpunkten die ursprünglichen Strahlen rekonstruieren. Dort, wo sich diese linear approximierten Strahlen kreuzen, befindet sich der Ursprung der Ablenkung. Die horizontale Projektion dieses Punktes auf den Schirm stellt die Positionstoleranz der Scaneinheit dar. Der Nullpunktstrahl gibt Auskunft über die Winkel-Einbautoleranz des eingebauten Scanners.

Scanners. Mathematisch lässt sich der Ablenkwinkel auf der Basis dieser Größen dann nach Gleichung 5.6 berechnen.

$$\theta(t) = -\arctan\left(\frac{X(t) - X_D}{d_0 - z}\right) - \theta_0 \quad (5.6)$$

Der Ablenkwinkel $\theta(t)$ berechnet sich aus dem Nullpunktswinkel θ_0 und einem negativen Arkustangens-Term. Dieser setzt sich aus der zeitabhängigen Schirmposition $X(t)$, der horizontalen Einbautoleranz (Querabstand) X_D , dem Abstandsursprung (Längsabstand) d_0 und der Tischposition z zusammen.

Die drei Größen X_D , d_0 und θ_0 werden vor der eigentlichen Charakterisierung der Scaneinheit mit dem RTST bestimmt. Der Nullpunktswinkel wird als derjenige Strahl identifiziert, der zeitlich mittig zwischen dem Maxima und dem Minima liegt bzw. bei stehendem Scanner besteht. Die Berechnung des Nullpunktswinkels erfolgt aus der Steigung einer linearen Regression (5.7) durch eben benannte Messpunkte (Gleichung 5.8). Die Abstände X_D und d_0 werden für jeden Strahl aus dem Schnittpunkt mit dem Nullpunktstrahl aus den Regressionskoeffizienten (a_i, b_i) nach den Gleichungen 5.9 und 5.10 bestimmt. Die Werte für X_D und d_0 errechnen sich dann als Mittelwerte der Ergebnisse über alle Strahlen. Ausreißer werden vorher herausgefiltert.

$$X_i = a_i + b_i \cdot z \quad (5.7)$$

$$\theta_0 = \arctan(b_0) \quad (5.8)$$

$$d_{0,i} = -\frac{b_i - b_0}{a_i - a_0} \quad (5.9)$$

$$X_{D,i} = \frac{b_i \cdot a_0 - b_0 \cdot a_i}{b_i - b_0} \quad (5.10)$$

5.3 Statische Kalibration des Messsystems

Der Prüfstand errechnet, basierend auf den Positionsdaten der PSD, den Ablenkwinkel des zu prüfenden MEMS-Scanners. Die Abbildung und damit die Transformation von Schirmkoordinaten auf PSD-Koordinaten muss kalibriert werden. Da sich weder die optischen Komponenten noch die Distanzen im Detektorpfad während der Messung ändern, ist diese Kalibrierung nur einmal durchzuführen.

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie diese statische Kalibration methodisch abläuft, welche Berechnungsgrundlagen verwendet werden und welche Ergebnisse sich für das System ergeben.

5.3.1 Kalibrationsaufbau

Der Aufbau der statischen Kalibration ähnelt dem eigentlichen Prüfstand. Da die PSD-Kamera zu kalibrieren ist, wird der Laserpfad so modifiziert, dass er als Referenz dienen kann. Die nachfolgende Abbildung 5.7 zeigt dies schematisch.

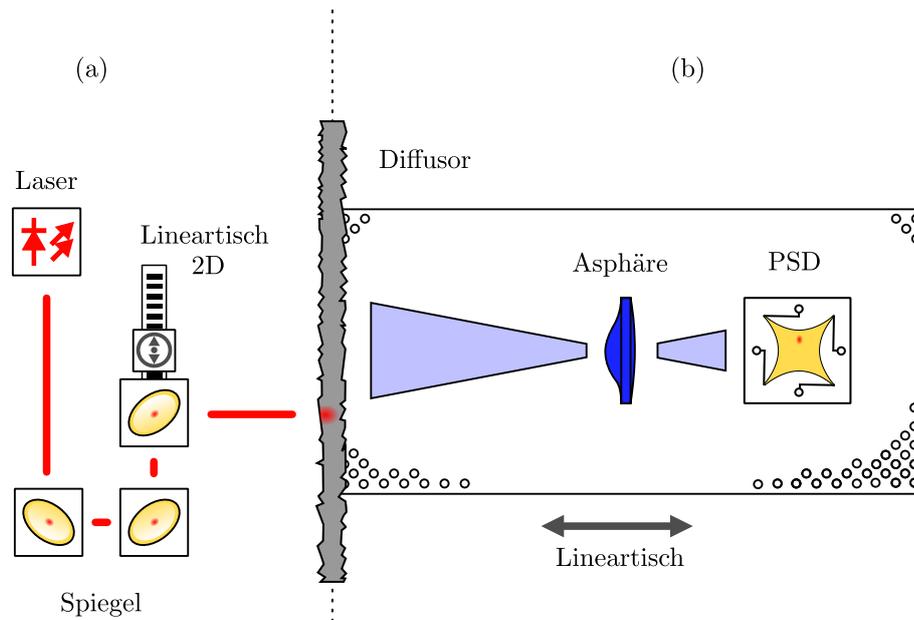


Abbildung 5.7: Schematischer Aufbau der Kalibration.

Der MEMS-Scanner wird durch zwei senkrecht aufeinander stehenden linearen Achsen mit je einem Spiegel zur Strahlablenkung ersetzt. Basis ist eine 300 mm lange Achse (LTS300/M, Thorlabs GmbH), die alle erwähnten Komponenten entlang der horizontalen Ablenkung des Scanners verfahren kann. Das Ausmaß der möglichen Verschiebung ist für die beschriebene Anwendung überdimensioniert. Der zu kalibrierende Bereich beträgt aufgrund des Sichtfelds der PSD-Kamera und der zu vermessenden Ablenkwinkel von bis zu ca. 20° etwa 30 mm. Die absolute Genauigkeit des Lineartischs beträgt $\pm 5 \mu\text{m}$, die Wiederholbarkeit und der Backlash sind mit $2 \mu\text{m}$ spezifiziert [123].

Vertikal über dem ersten Spiegel befindet sich ein zweiter Spiegel, der mithilfe einer manuellen Achse (PT1/M, Thorlabs GmbH) in seiner Höhe verstellt werden kann. Da die zu vermessenden Scanner nur horizontal schwingen und geringe Winkelfehler beim Einbau erwartet werden, ist der vertikale Kalibrationsbereich auf 5 mm begrenzt. Der Fahrweg der Achse von 25 mm bei einer sichtbaren Auflösung von $10 \mu\text{m}$ ist dafür ausreichend [122]. Mithilfe von zwei Blenden werden die Winkel der Spiegel so eingestellt, dass sie eine Ablenkung von 90° erzeugen. Die Linearachsen sind entlang des Koordinatensystems

des Prüfstands ausgerichtet. Die horizontale (lange) Achse verläuft somit senkrecht zum Schirm.

Für die Messung wird ein zweidimensionales, rechteckiges Muster mit 29×7 Punkten mit einem horizontalen Abstand von 1 mm abgefahren. Vertikal erstreckt sich das Muster über insgesamt 5 mm. Die Punkte sind symmetrisch verteilt. Für jeden Punkt werden die drei PSD-Spannungen über eine Zeit von ca. 0,6 s aufgezeichnet. Die Spannungen werden gemittelt und anschließend über Gleichung 5.3 zu PSD-Positionen umgerechnet, welche im Anschluss für die Optimierung verwendet werden.

5.3.2 Methodik zur Berechnung

Da es sich bei der Transformation von Schirmkoordinaten zu PSD-Koordination um eine optische Abbildung handelt, wird eine Kamerakalibrierung nach dem Stand der Technik durchgeführt.

Eine Optimierung bestimmt die Modellparameter, welche wiederum für eine Umsetzungstabelle (kurz: LUT, „Lookup table“) verwendet werden. Durch die Messung der PSD-Spannungen lässt sich somit über die PSD-Positionen die Position des Laserspots auf dem Schirm errechnen.

5.3.2.1 Mathematische Darstellung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick zu den mathematischen Grundlagen für die Koordinatentransformation unter Berücksichtigung der Verzeichnung.

Transformation des Koordinatensystems

Allgemein lässt sich die Transformation von Sensorkoordinaten zu Welt- hier Schirmkoordinaten, mithilfe von Matrizenmultiplikation nach dem Kamera-Pinhole-Modell beschreiben [146]. Gleichung 5.11 beschreibt den generellen Zusammenhang.

$$s \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{H}_{\text{int}} \cdot \mathbf{H}_{\text{ext}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Wie aus der Gleichung hervorgeht, lässt sich jeder Punkt mit den Schirmkoordinaten X, Y, Z über Matrixmultiplikationen mit einer sogenannten Homografiematrix \mathbf{H} auf die Sensorebene als Vektor $[u \ v \ 1]^T$ abbilden. Diese Matrix lässt sich ferner in eine intrinsischen \mathbf{H}_{int} und einer extrinsischen Matrix \mathbf{H}_{ext} aufteilen. Der Parameter u entspricht der horizontalen, v der vertikalen Position auf dem Sensor; s ist eine Vergrößerungsfaktor.

Für den hier beschriebenen Fall errechnet sich die Transformation zwischen Schirm- und PSD-Koordinatensystem nach Gleichung 5.12.

$$s \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_{\text{int}}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\delta) & \sin(\delta) & t_x \\ -\sin(\delta) & \cos(\delta) & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_{\text{ext}}} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Die intrinsische Matrix ist quadratisch, vom Typ 3×3 und beinhaltet zunächst die Vergrößerungsfaktoren α und β , die für die Skalierung in den Sensorachsen u und v verantwortlich sind. Diese Faktoren sind maßgeblich durch die Brennweite der verwendeten Linse gegeben. Die Parameter u_0 und v_0 sind die Koordinaten des sogenannten „Principal Point“, der Ursprungspunktverschiebung in der Sensorebene. Der „Skew“ der beiden Achsen zueinander ist durch γ gegeben.

Allgemein beschreibt die extrinsische Matrix die Verschiebung und Verdrehung der Szene zur Kamera: $\mathbf{H}_{\text{ext}} = \mathbf{R} + \mathbf{t}$. Beides kann in allen drei Achsen auftreten. Hier kompensiert die extrinsische Matrix die Verschiebung zwischen dem Detektorpfad und dem Kalibrieremuster (Szene) und korrigiert etwaige Verdrehungen der Kamera zum globalen Koordinatensystem. Durch die Verwendung des Schirms in einem fest installierten Abstand, lässt sich die Anzahl der möglichen Freiheitsgrade auf eine Rotation entlang Z mit je einer Verschiebung in den beiden Achsen X, Y reduzieren. Die beiden Parameter t_x, t_y stehen hier für die Verschiebung des Kalibrationsmusters gegenüber dem Koordinatensystem der Kamera in den jeweiligen Achsen. Dies entsteht durch eine abweichende Definition des relativen Achsen-Ursprungs im Vergleich zu dem Ursprung der Kamera. Die Rotation der PSD entlang der Z -Achse ist durch den Winkel δ gegeben.

Verzeichnung

Das oben beschriebene Pinhole-Modell ist insofern limitiert, als dass es keinerlei optische Abbildungsfehler berücksichtigt. Diese können allerdings je nach Art und Orientierung der verwendeten Linse einen signifikanten Einfluss auf die Abbildung haben. Insbesondere äußert sich dies in einer Verzeichnung in der Sensorebene. Brown et al. beschrieb deshalb 1966 eine allgemeine Darstellung möglicher radialer und tangentialer Verzeichnungen [17]. Der Zusammenhang aus besagter Veröffentlichung ist in der hier verwendeten Notation in Gleichung 5.13 gezeigt.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ v_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_u + (u_u - u_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + \left(p_1 (r^2 + 2(u_u - u_0)^2) + 2p_2 (u_u - u_0)(v_u - v_0) \right) \\ v_u + (v_u - v_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + \left(p_2 (r^2 + 2(v_u - v_0)^2) + 2p_1 (u_u - u_0)(v_u - v_0) \right) \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Der messbare, verzeichnete Punkt mit den Koordinaten u_d, v_d setzt sich je als Summe aus dem idealen, nicht messbaren Punkt aus dem Pinhole-Modell u_u, v_u , der radialen Verzeichnung mit den Parametern k_1 und k_2 und dem tangentialen Term mit den Parametern p_1 und p_2 zusammen. Allgemein lassen sich die Terme k_i und p_i beliebig erweitern; für den hier betrachteten Fall sind je zwei Konstanten verwendet worden. Die Größe r ist der minimale Abstand zwischen den idealen Koordinaten und dem Principal-Point mit den Koordinaten u_0, v_0 und errechnet sich zu: $r = \sqrt{(u_u - u_0)^2 + (v_u - v_0)^2}$. Vereinfacht lässt sich dieses Modell für die radiale Verzeichnung auch invertieren [43]. Dadurch kann aus einem gemessenen, verzeichneten Wert direkt der Wert ohne Verzeichnung bestimmt werden. Dies ist in Gleichung 5.14 dargestellt.

$$\begin{bmatrix} u_u \\ v_u \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4} \cdot \begin{bmatrix} u_d - u_0 \\ v_d - v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

5.3.2.2 Technische Implementierung

Um das Modell für die Bestimmung der Schirmposition aus der PSD-Position verwenden zu können, müssen die Modellparameter bestimmt werden. Dazu werden die Wertepaare der Kalibrationsmessung als Messdaten für eine Optimierung nach der Methode der kleinsten Quadrate („least squares“) verwendet. Dieses Kapitel gibt einen Überblick.

Optimierung der Homografiematrix

Der erste Ansatz geht davon aus, dass keine Verzeichnung vorliegt und deshalb die Messdaten direkt in Schirmpositionen umgewandelt werden können: $\mathbf{M} = \mathbf{f}(\mathbf{m})$. Der Funktionsvektor \mathbf{f} hängt von dem Eingangsvektor \mathbf{m} ab, der sich aus den beiden Komponenten aller PSD-Positionsmesswerte wie folgt zusammensetzt: $\mathbf{m} = [u_{d,i} \ \dots \ u_{d,n} \ v_{d,i} \ \dots \ v_{d,n}]^T$. Über diesen Funktionsvektor lassen sich die zugehörigen Schirmpositionen \mathbf{M} bestimmen, die eine ähnliche Form aufweisen: $\mathbf{M} = [X_i \ \dots \ X_n \ Y_i \ \dots \ Y_n]^T$. Der Index i läuft dabei über alle Messdaten mit dem Umfang n . Der Funktionsvektor \mathbf{f} lässt sich über die Gleichung 5.12 dann wie folgt in Gleichung 5.15 darstellen.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{s} \cdot \begin{bmatrix} u_u(u_d) \\ v_u(v_d) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Um ein Optimum für die Parameter des Funktionsvektors zu finden, muss ein Minimierungsproblem gelöst werden, das nach Gleichung 5.16 beschrieben ist.

$$\min_{\mathbf{l}} \|\mathbf{f}(\mathbf{m}) - \mathbf{M}\|_2^2 \quad (5.16)$$

Der Vektor \mathbf{l} ist ein Spaltenvektor, der alle Optimierungsparameter der Gleichung 5.12 beinhaltet: $\mathbf{l} = [\alpha \ \beta \ \gamma \ u_0 \ \dots]^T$. Die gemessenen PSD-Positionen finden sich in \mathbf{m} , die eingestellten Schirmpositionen in \mathbf{M} .

Erweiterung des Modells

Um eine bessere Beschreibung der Abbildung zu erzeugen, ist in einem zweiten Ansatz das vollständige Verzeichnungsmodell aus Gleichung 5.13 verwendet worden. Dazu ist das Minimierungsproblem so umzustellen, dass als Eingangsgröße die idealen Schirmpositionen auf die Ausgangsgröße der gemessenen PSD-Positionen abgebildet werden. Dies kann mit Gleichung 5.17 beschrieben werden.

$$\min_{\mathbf{l}} \|\mathbf{g}(\mathbf{M}) - \mathbf{m}\|_2^2 \quad (5.17)$$

Der Funktionsvektor \mathbf{g} setzt sich dann aus den Gleichungen 5.12 und 5.13 zusammen. Die Vektoren \mathbf{M} und \mathbf{m} sind identisch zu der Beschreibung oben. Die Optimierungsparameter im Vektor \mathbf{l} erweitern sich um die Parameter der tangentialen Verzeichnung.

Über die Optimierung aus Gleichung 5.17 lassen sich somit aus den gemessenen PSD-Positionen und den eingestellten Schirm-Sollpositionen die Modellparameter aus den Gleichungen 5.12 und 5.13 bestimmen.

Ablauf der Optimierung

Da das Optimierungsproblem aus Gleichung 5.17 viele lokale Minima besitzt, ist es wichtig angemessene Startwerte für die Modellparameter zu wählen. Hier wird deshalb zunächst nur die einfache Optimierung vorwärts aus Gleichung 5.16, dann die Optimierung rückwärts (nur mit radialer Verzeichnung) und letztlich das volle Modell rückwärts mit radialer und tangentialer Verzeichnung durchgeführt. Die Startwerte der Optimierungsparameter \mathbf{l}_i der nächsten Stufe sind dann durch die Ergebnisse der vorherigen Stufe bestimmt. Die nachfolgende Abbildung 5.8 veranschaulicht dies.

5.3.3.1 Optimierungsparameter

Die Modellparameter des finalen Optimierungsschritts, welche in Abbildung 5.8 mit \mathbf{l}_3 gekennzeichnet sind, finden sich in der nachfolgenden Tabelle 5.1. Das Zahlenformat ist zur Übersichtlichkeit auf fünf Dezimalstellen begrenzt worden.

Tabelle 5.1: Optimierungsparameter der Kalibrierung.

Parameter	Einheit	Wert
α	1	0,13889
β	1	-0,13341
δ	°	0,14091
k_1	mm ⁻²	0,01837
k_2	mm ⁻⁴	-0,00089
p_1	mm ⁻¹	-0,01174
p_2	mm ⁻¹	-0,00016
γ	1	0,00396
t_x	mm	2,42598
t_y	mm	0,77195
u_0	mm	-1,42800
v_0	mm	0,03922

Die Beträge der Werte für die Vergrößerungsparameter α und β sind sich sehr ähnlich. Die unterschiedlichen Vorzeichen sind auf die Wahl der Koordinatenachsen zurückzuführen. Sowohl der Rotationswinkel δ als auch der „Skew“ γ sind mit sehr kleinen Werten nahezu Null, was eine gute Ausrichtung bedeutet. Die externen Verschiebungsparameter t_x und t_y sind im einstelligen Millimeterbereich. Dies trifft auch für die Parameter u_0 und v_0 zu. Die Größenordnung der Parameter stimmt mit den Größen der physikalischen Objekte und deren Abstände überein. Die Plausibilität der Verzeichnungsparameter k_i und p_i ist anhand der Werte nur bedingt zu beurteilen.

5.3.3.2 Modellergebnisse

Optimierte Parameter sind in einem Schritt zur Verifizierung verwendet worden, um die Kalibrations-Messdaten über die LUT in Schirmdaten umzurechnen. Die nachfolgende Abbildung 5.9 zeigt das 2D-Raster der Kalibrierung für die Sollposition und für die berechnete Position.

Qualitativ wird aus der Abbildung ersichtlich, dass die Abweichungen sehr gering sind. Da die vertikale Achse eine deutlich höhere Auflösung bietet, ist auch der scheinbare Unterschied größer. Die Abweichung der berechneten Position von der Sollposition ist für die quantitative Betrachtung in der folgenden Abbildung 5.10 dargestellt.

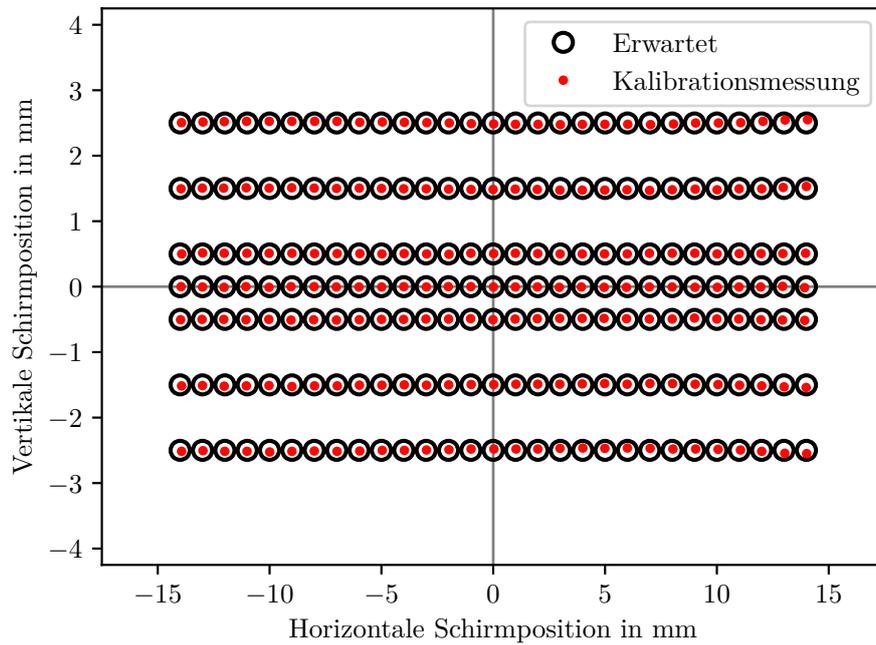


Abbildung 5.9: Umgerechnete Laserposition auf dem Schirm für die Messdaten aus der Kalibration (rot) mit den eingestellten Sollpositionen (schwarz) (basierend auf [149]).

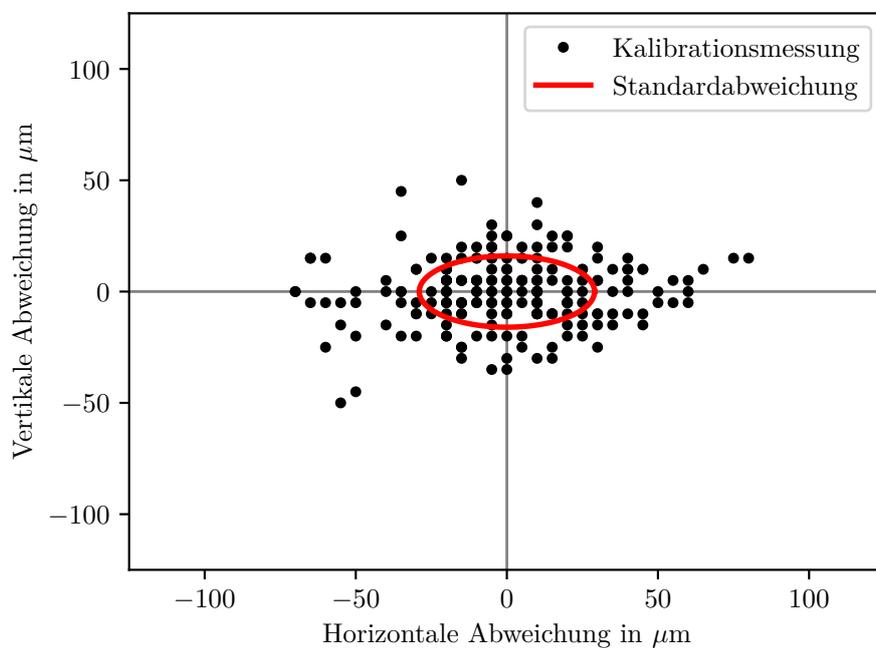


Abbildung 5.10: Gemessene Abweichung der Kalibrierung von den eingestellten Laserpositionen auf dem Schirm (basierend auf [149]).

Wie aus der zweidimensionalen Darstellung in Abbildung 5.10 ersichtlich ist, sind die Abweichungen um das Zentrum (0;0) verteilt. Die pixelartige Erscheinung entsteht durch die gegebene Quantisierung der Auflösung der LUT (5 μm). Die maximalen Abweichungen in horizontaler Richtung sind mit $\pm 80 \mu\text{m}$ etwas größer, als die in vertikaler Richtung ($\pm 50 \mu\text{m}$).

Zur weiteren Diskussion sind die Abweichungen statistisch betrachtet worden: Die Verteilungen für die horizontale und die vertikale Positionsabweichung ist in der nachfolgenden Abbildung 5.11 inklusive eines Gaußfits dargestellt.

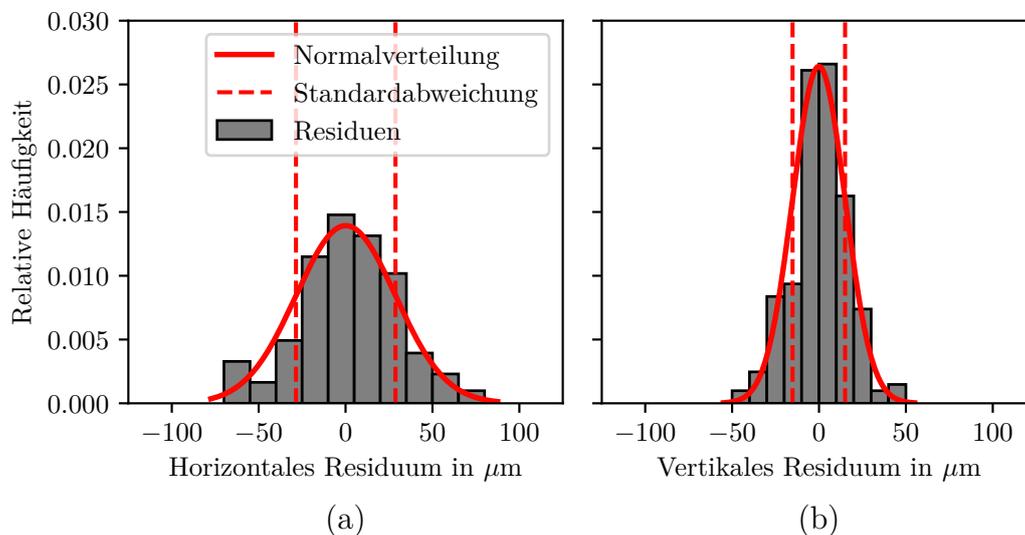


Abbildung 5.11: Gemessene Abweichung der Kalibrierung von den eingestellten Laserpositionen auf dem Schirm in Form eines Histogramms: horizontal (a) und (b).

Die Verteilung der Abweichungen stellt eine gaußsche Glockenkurve dar. Die Standardabweichung errechnet sich zu: $\sigma_X = 29 \mu\text{m}$ und $\sigma_Y = 16 \mu\text{m}$. Diese beiden Werte sind die statistischen Abweichungen, welche bei der Berechnung der Schirmposition aus den PSD-Positionsdaten innerhalb des Messbereichs auftreten.

5.4 Statische Validierung

Das kalibrierte Messsystem soll in einem zweiten Schritt validiert werden. Im Besonderen geht es dabei um die Vermessung von Winkeln. Der erste Validierung wird statisch mithilfe einer Winkelreferenz durchgeführt. Diese Kapitel beschreibt die Methodik, den Messaufbau und die Ergebnisse.

5.4.1 Übersicht und Methodik

Um eine Aussage über die Leistungsfähigkeit der Ablenkungswinkelmessung des Systems treffen zu können, soll in einem ersten Schritt fest definierte, gut bekannte Ablenkungswinkel eingestellt werden. Dazu wird anstelle des zu charakterisierenden MEMS-Scanners ein Rotationstisch (Thorlabs GmbH, PR01/M) mit einem Spiegel verwendet. Die Reflektionsoberfläche des Spiegels befindet sich im Drehzentrum des Rotationstisches. Der Strahl ist so ausgerichtet, dass dieser bei einer Winkeleinstellung von 45° die Mitte der kalibrierten Fläche auf dem Schirm trifft. Der kalibrierte Detektionspfad bleibt unverändert. Abbildung 5.12 veranschaulicht den Aufbau.

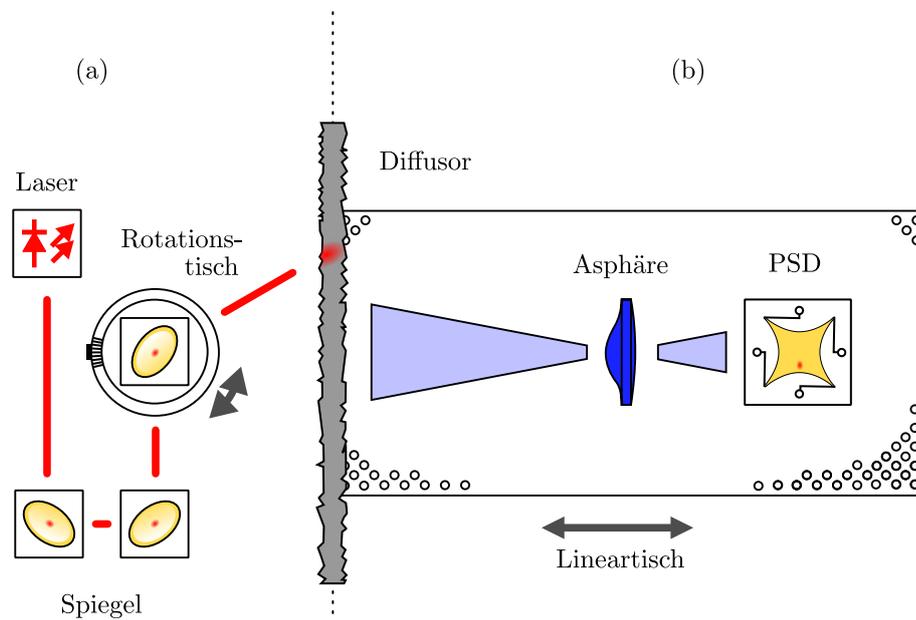


Abbildung 5.12: Aufbau zur statischen Validierung: (a) Laserpfad, (b) Detektorpfad.

Mithilfe der Messskala des Rotationstisches werden für die Messung 14 verschiedene Ablenkungswinkel über einen Bereich von insgesamt ca. 50° eingestellt. Aufgrund der Winkelverdopplung am Spiegel beträgt die mögliche Einstellaufösung minimal $\pm 0,2^\circ$. Die Messunsicherheit der Winkeleinstellung wird aufgrund der geringen Größe und Zugänglichkeit der Skala als $\pm 0,5^\circ$ angenommen. Für jeden eingestellten Winkel wird die Längsachse der PSD-Kamera über den gesamten Bereich von 25 mm verfahren. An bestimmten Abständen werden die drei PSD-Spannungen mit dem Oszilloskop aufgezeichnet und gespeichert.

Zur Berechnung des Ablenkungswinkels werden die aufgenommenen Spannungen gemittelt und mithilfe von Gleichung 5.3 in PSD-Positionsdaten umgewandelt. Die aus der Kalibration ermittelte LUT wird genutzt, um diese Daten in Schirmdaten umzurechnen. Aus dieser

Bestimmung ergibt sich somit für jeden Winkel und jeden Abstand eine Position auf dem Schrim. Eine lineare Regression, wie im Kapitel zum RTST beschreiben (Kapitel 5.2), lässt diese vektorielle Methode über die Steigung auf einen Winkel schließen. Ferner kann über die zweite Methode unter Verwendung des trigonometrischen Zusammenhangs aus Gleichung 5.6 des RTST ebenfalls ein Ablenkwinkel bestimmt werden.

5.4.2 Bestimmung der Messunsicherheit

Die Abschätzung der Messunsicherheit beruht auf der allgemeinen Gaußschen Fehlerfortpflanzung für unabhängige, fehlerbehaftete Eingangsgrößen. Gleichung 5.18 zeigt den Zusammenhang für: $y = f(x_i)$ mit der Standardabweichung σ_{x_i} [48].

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \sigma_{x_i} \right)^2} \quad (5.18)$$

Demnach errechnet sich die Standardabweichung der Ausgangsgröße y über die Ableitungen der Ausgangsgröße über jede Eingangsgröße x_i und deren jeweiligen Standardabweichung σ_{x_i} . Zur Berechnung ist demnach die Kenntnis der Funktion $y = f(x_i)$ notwendig.

Ein weiterer allgemeiner Zusammenhang, der im Folgenden benötigt wird, errechnet sich nach Gleichung 5.19 für die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts aus N Einzelwerten: $y = \bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i^N x_i$.

$$\sigma_y = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_i^N \sigma_{x_i}^2} \quad (5.19)$$

Im Speziellen werden bei der linearen Regression des RTST für alle Geradenparameter b_i und a_i die zugehörigen Unsicherheiten bestimmt. Diese werden dann bei der Berechnung der Abstandstoleranzen $d_{0,i}$ und $X_{D,i}$ nach Gleichung 5.9 und 5.10 verwendet. Um dies zu vereinfachen, wird die größte Messunsicherheit aus allen Anpassungen für beide Koeffizienten herangezogen. Über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung nach Gleichung 5.18 lassen sich so die Gleichungen 5.20 für die Unsicherheit des Längsabstands $\sigma_{d_{0,i}}$ und Gleichung 5.21 für die Unsicherheit des Querabstands $\sigma_{X_{D,i}}$ herleiten. Nachdem letztlich über alle Geraden des Strahlenbündels gemittelt wird, um den tatsächlichen Ursprung zu bestimmen, werden auch die jeweiligen Unsicherheiten gemäß Gleichung 5.19 fortgepflanzt.

$$\sigma_{d_{0,i}} = d_{0,i} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{a_i}}{a_i - a_0} \right)^2 + \left(-\frac{\sigma_{a_0}}{a_i - a_0} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{b_i}}{b_0 - b_i} \right)^2 + \left(-\frac{\sigma_{b_0}}{b_0 - b_i} \right)^2} \quad (5.20)$$

$$\sigma_{X_D,i} = \sqrt{\left(\sigma_{b_0} \cdot \frac{b_i \cdot (a_0 - a_i)}{(b_0 - b_i)^2}\right)^2 + \left(-\sigma_{b_i} \cdot \frac{b_0 \cdot (a_0 - a_i)}{(b_0 - b_i)^2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{a_0}}{1 - \frac{b_0}{b_i}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{a_i}}{1 - \frac{b_i}{b_0}}\right)^2} \quad (5.21)$$

Die Standardabweichung des vektorieell bestimmten Winkels aus der Steigung der Regressionen lässt sich ebenfalls durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung herleiten (Gleichung 5.22).

$$\sigma_{\theta_{v,i}} = \frac{\sigma_{b_i}}{b_i^2 + 1} \quad (5.22)$$

Letztlich lässt sich über eine weitere Gaußsche Fehlerfortpflanzung der Gleichung 5.6 die Standardabweichung für die trigonometrische Bestimmung des Winkels $\sigma_{\theta_{t,i,j}}$ durch die Gleichung 5.23 ausdrücken.

$$\sigma_{\theta_{t,i,j}} = \sqrt{\frac{\left(p \cdot \sigma_{X_{i,j}}\right)^2 + \left(-p \cdot \sigma_{X_D}\right)^2 + \left(-q \cdot \sigma_d\right)^2 + \left(q \cdot \sigma_{z_j}\right)^2}{p^2 + q^2}} + (-\sigma_{\theta_0})^2 \quad (5.23)$$

Für die beiden Hilfsgrößen gilt: $p = (d_0 - z_j)$, $q = (X_{i,j} - X_D)$. Der Parameter d_0 ist der ermittelte laterale Toleranzabstand (Längsabstand), z_j die Position der Linearachse, $X_{i,j}$ die bestimmte horizontale Schirmposition für einen eingestellten Winkel (Index i) im Abstand (Index j) und X_D der oben berechnete Querabstand. Die zugehörigen σ beschreiben die jeweilige Unsicherheit der vier Größen. Die Standardabweichung des Ablenkwinkels des Nullpunktstrahls ist mit σ_{θ_0} gekennzeichnet.

5.4.3 Ergebnisse der statischen Validierung

Dies Unterkapitel veranschaulicht die Ergebnisse der statischen Validierung mittels Rotationstisch. Dabei wird auf die RTST-Methodik, die Linearität und letztlich auf die bestimmten Ablenkwinkel eingegangen.

RTST-Methodik

Das erste Ergebnis der Messreihe ist die Laserposition auf dem Schirm gegenüber dem Abstand. Abbildung 5.13 zeigt die gemessene horizontale Schirmposition für selektierte Winkel aufgetragen gegenüber der Achsenposition.

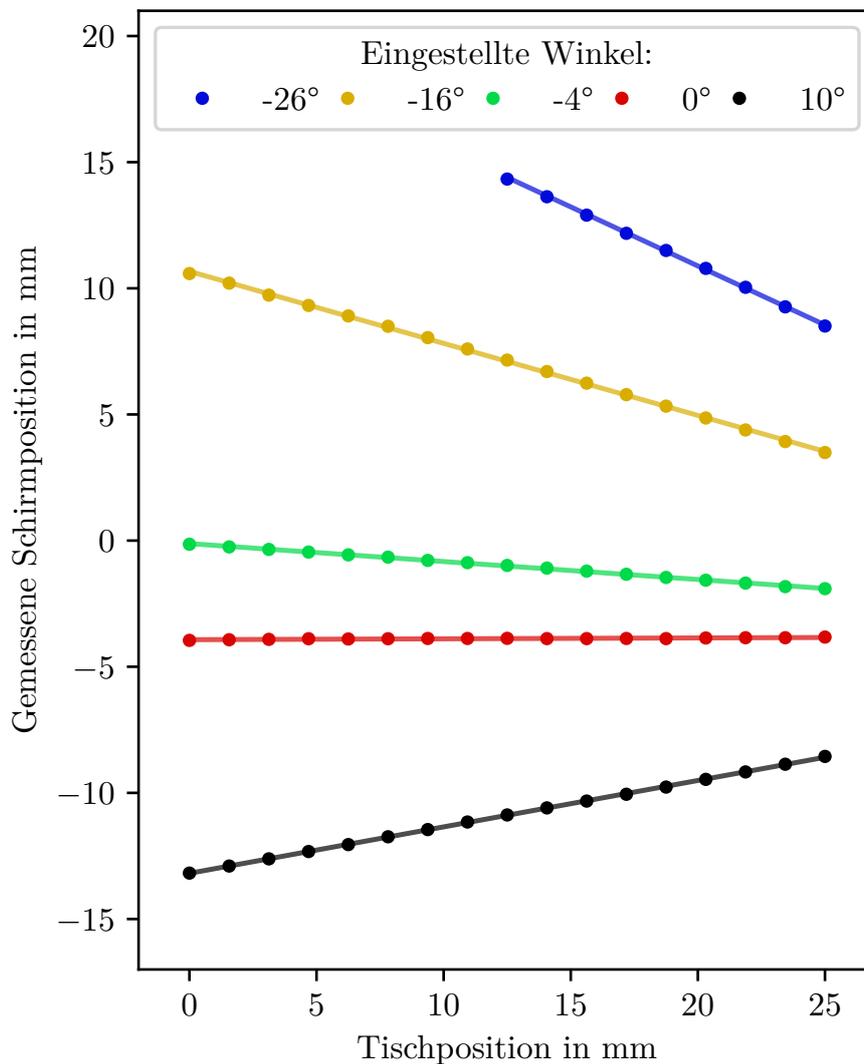


Abbildung 5.13: Gemessene Laserposition auf dem Schirm mit linearer Regression für verschiedene Schlittenabstände und eingestellte Ablenkwinkel (basierend auf [149]).

Zunächst fällt auf, dass die dargestellten Messpunkte der linearen Regression folgen. Dies trifft sowohl für kleine Ablenkwinkel in der Mitte des Schirms als auch für große Ablenkwinkel am Rand des Schirms zu. Die Tatsache, dass es weniger Messpunkte für Strahlen am Rand des Schirms gibt, hängt mit der begrenzten Kalibrationsfläche des Schirms zusammen. In der Y-Achse der Graphik ist ersichtlich, dass die maximal gemessene horizontale Schirmposition immer innerhalb des kalibrierten Bereichs von insgesamt 29 mm bleibt. Für große Ablenkwinkel stehen demnach immer weniger Messpunkte für eine lineare Regression zur Verfügung.

Die Residuen der dargestellten linearen Anpassungen zeigen eine Systematik eines Poly-

noms zweiter Ordnung mit einer maximalen Amplitude von ca. 50 μm . Dies deutet darauf hin, dass es weitere Faktoren in dem Messsystem gibt, die in dem Modell noch nicht berücksichtigt worden sind. Eine Regression der Ordnung zwei würde diese Abweichung reduzieren; dieses Modell ist zum jetzigen Zeitpunkt allerdings physikalisch nicht erklärbar und wird deshalb nicht verwendet.

Aus den bestimmten Regressionsgeraden errechnen sich vektorielle Ablenkwinkel nach Gleichung 5.8. Die beiden Toleranzmaße zum Abstand d_0 und X_D werden nach den Gleichungen 5.9 und 5.10 bestimmt. Über eine Mittelwertbildung dieser Schnittpunktkoordinaten errechnet sich schließlich der erwartete Drehpunkt der Spiegeloberfläche. Die bestimmten Werte für die eingestellten Spiegelwinkel sind in der nachfolgenden Tabelle 5.2 gezeigt.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der linearen Regression der statischen Validierung.

Eingestellter Winkel in $^\circ$	b_i	a_i in mm	d_i in mm	$X_{D,i}$ in mm
-30	$-0,560 \pm 0,006$	$25,12 \pm 0,19$	$51,6 \pm 0,7$	$-3,75 \pm 0,05$
-26	$-0,468 \pm 0,006$	$20,25 \pm 0,19$	$51,3 \pm 0,8$	$-3,75 \pm 0,05$
-20	$-0,354 \pm 0,006$	$14,28 \pm 0,19$	$51,0 \pm 1,1$	$-3,75 \pm 0,05$
-18	$-0,314 \pm 0,006$	$12,25 \pm 0,19$	$51,0 \pm 1,2$	$-3,75 \pm 0,05$
-16	$-0,286 \pm 0,006$	$10,67 \pm 0,19$	$50,5 \pm 1,3$	$-3,75 \pm 0,05$
-14	$-0,250 \pm 0,006$	$8,85 \pm 0,19$	$50,4 \pm 1,5$	$-3,75 \pm 0,05$
-10	$-0,167 \pm 0,006$	$4,71 \pm 0,19$	$50,8 \pm 2,2$	$-3,75 \pm 0,05$
-4	$-0,071 \pm 0,006$	$-0,12 \pm 0,19$	51 ± 5	$-3,75 \pm 0,06$
0	$0,0035 \pm 0,0010$	$-3,928 \pm 0,014$	-	-
4	$0,078 \pm 0,006$	$-7,73 \pm 0,19$	51 ± 5	$-3,75 \pm 0,06$
10	$0,184 \pm 0,006$	$-13,19 \pm 0,19$	$51,3 \pm 2,1$	$-3,75 \pm 0,05$
14	$0,252 \pm 0,006$	$-16,59 \pm 0,19$	$51,0 \pm 1,5$	$-3,75 \pm 0,05$
16	$0,297 \pm 0,006$	$-18,91 \pm 0,19$	$51,1 \pm 1,3$	$-3,75 \pm 0,05$
18	$0,342 \pm 0,006$	$-20,95 \pm 0,19$	$50,2 \pm 1,1$	$-3,75 \pm 0,05$
Mittelwert	-	-	$50,9 \pm 0,5$	$-3,75 \pm 0,02$

Die bestimmten Ablenkwinkel aus der Steigung der Regressionen (Vektormethode) reichen von ca. -19° bis ca. 29° . Für die weitere Bestimmung der Winkel nach der trigonometrischen Methode nach Gleichung 5.6 wird für den Nullpunktswinkel das Ergebnis für den eingestellten Winkel von 0° verwendet. Mit der vektoriellen Methode errechnet sich aus den Messdaten hierfür $\theta_0 = -0,2^\circ$. Dieser Wert stellt einen kleinen - realistischen - Einbaufehler nahe Null dar. Diese Konfiguration ist auch als Referenz für die Bestimmung der Schnittpunkte verwendet worden, weshalb in Tabelle 5.2 keine Werte für d_i und $X_{D,i}$ vorhanden sind. Die berechneten Werte für den Ablenkursprung errechnen sich im Mittel zu: $d_0 = 50,9 \text{ mm}$ und $X_D = -3,75 \text{ mm}$.

Linearität

Um die Linearität des Messsystem zu bestimmen werden die gemessenen Winkel mit beiden Verfahren mit den eingestellten Winkeln verglichen. Für die trigonometrische Bestimmung des Winkels nach Gleichung 5.6 werden die Ergebnisse des Längs- und Querabstands aus Tabelle 5.2 verwendet. Diese wurden über die verschiedenen Abstände gemittelt. Für eine bessere Beurteilung der Linearität werden die Winkel auf den ersten Messwert bezogen (relativer Ablenkwinkel). Die nachfolgende Abbildung 5.14 zeigt die relativen Ablenkwinkel aus der vektoriellen Methode und jene berechnet mit der trigonometrischen Methode aufgetragen gegenüber dem eingestellten, relativen Ablenkwinkel. Die Linearität des Messsystems wird durch lineare Regressionen bestimmt. Die sichtbaren Fehlerbalken stellen die ermittelte Messunsicherheit dar.

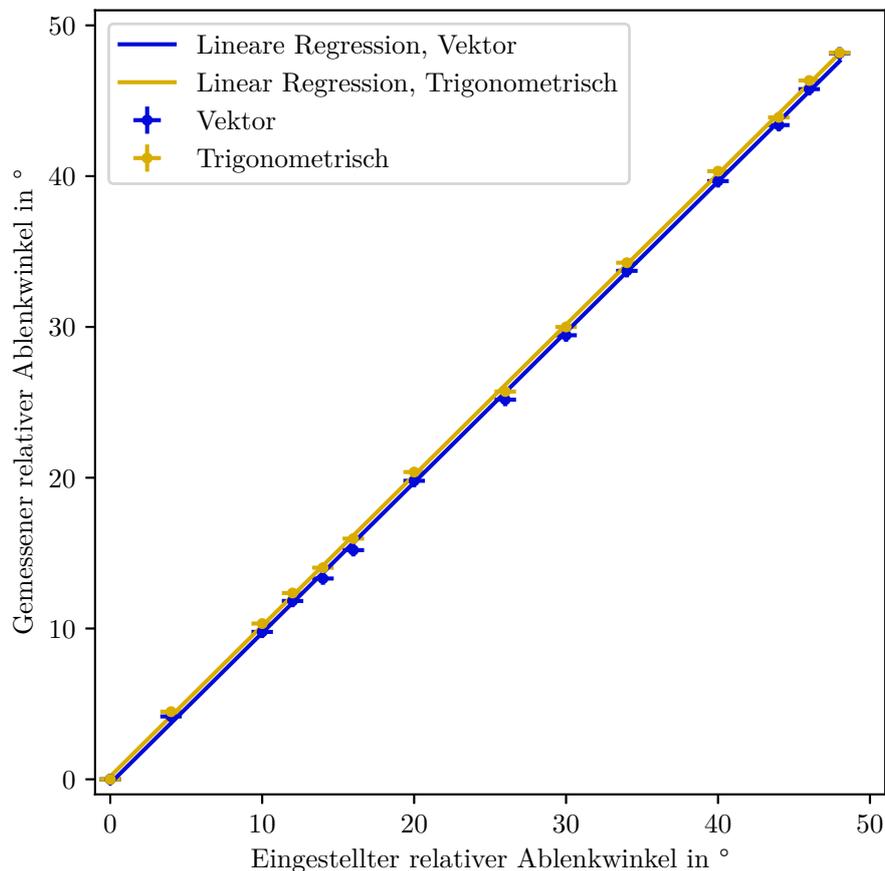


Abbildung 5.14: Linearität der Messmethoden: Relative, gemessene Ablenkwinkel für zwei Berechnungsmethoden gegenüber den eingestellten Winkeln (basierend auf [149]).

Wie aus der Darstellung ersichtlich ist, folgen beide Datensätze einem linearen Verhältnis. Das Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0.9996$ für die vektorielle und $R^2 = 0.9998$ für die

trigonometrische Berechnungsmethode. Die linearen Regressionen können über die beiden Gleichungen 5.24 und 5.25 beschrieben werden.

$$\Delta\theta_{\text{vektor}} = (1 - 2 \times 10^{-3}) \cdot \Delta\theta_{\text{set}} - 0,3^\circ \quad (5.24)$$

$$\Delta\theta_{\text{trig}} = (1 - 1 \times 10^{-3}) \cdot \Delta\theta_{\text{set}} + 0,20^\circ \quad (5.25)$$

Die Steigungen sind annähernd 1, wobei die trigonometrische Methode noch kleinere Abweichungen zeigt. Die absolute Verschiebung von $-0,3^\circ$ bzw. $0,20^\circ$ beschreibt eine systematische Abweichung zur Referenz in der Größe der Messauflösung der Referenz. Die Residuen der linearen Anpassungen sind in Abbildung 5.15 gezeigt.

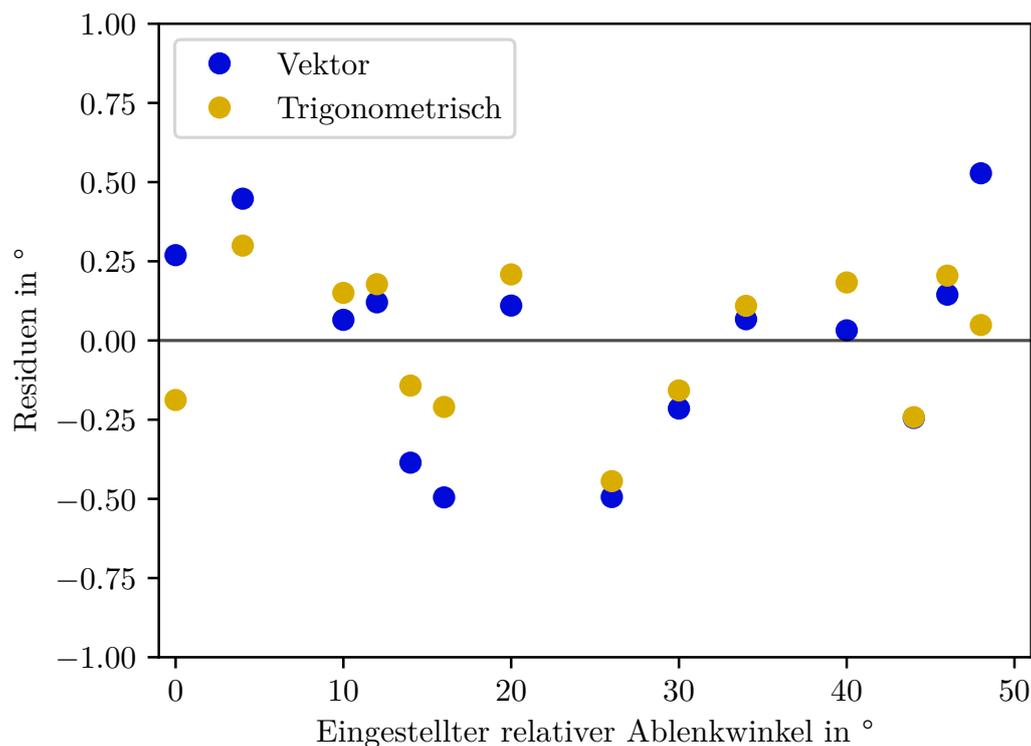


Abbildung 5.15: Linearität der Messmethoden: Relative, gemessene Ablenk Winkel für zwei Berechnungsmethoden gegenüber den Residuen der linearen Regressionen.

Die Residuen aus Abbildung 5.15 zeigen kein Systematik mit steigendem eingestellten relativen Ablenk Winkel. Demnach gibt es keine verbleibende systematische Verzeichnung in dem Messsystem für die Bestimmung von Ablenk Winkeln. Die maximalen Residuen betragen in beiden Fällen ca. $\pm 0,5^\circ$.

Vergleich der bestimmten Ablenkwinkel

Letztlich sollen die eingestellten und bestimmten Ablenkwinkel miteinander verglichen werden. Die Unterschiede zwischen den berechneten und den eingestellten Ablenkwindeln sind um den systematischen Anteil korrigiert und so in Abbildung 5.16 dargestellt.

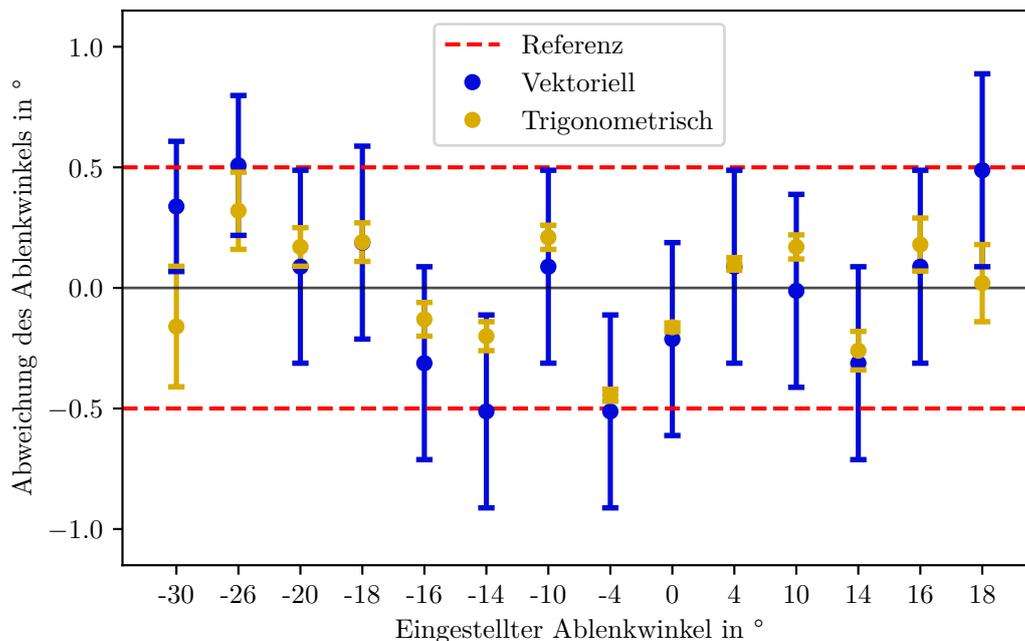


Abbildung 5.16: Statistische Abweichung der vektoriellen (blau) und trigonometrischen (gelb) Bestimmung des Ablenkwinkels gegenüber der Referenz (rot).

Die mittlere systematische Abweichung beträgt $0,612^\circ$ für die vektorielle und $0,560^\circ$ für die trigonometrische Berechnung. Sie ist in der Abbildung 5.16 nicht zu sehen. Diese Abweichung besteht aufgrund der Tatsache, dass der Drehtisch nur bis auf ein gewisses Maß absolut eingestellt werden kann.

Wie aus Abbildung 5.16 qualitativ hervorgeht, sind die Unsicherheiten der vektoriellen Methode qualitativ größer, als die der trigonometrischen Berechnung. Ferner fällt auf, dass die Abweichungen weiter streuen und auch außerhalb der Messunsicherheit der Referenz von $0,5^\circ$ sind. Aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnen sich Standardabweichungen von bis zu $0,4^\circ$. Die Abweichungen der trigonometrischen Bestimmung (gelb) hingegen sind immer innerhalb des Referenzkorridors (rot). Die Standardabweichungen betragen hier bis zu $0,25^\circ$.

Zusammenfassung der Winkelmessung

Die durch die RTST-Methode ermittelten trigonometrischen Ablenkwinkel wurden mit den vektoriellen Ablenkwindeln und mit den eingestellten Winkeln relativ verglichen, um eine

Aussage über die Linearität über den Messbereich treffen zu können (Abbildung 5.14). Dabei wurden hohe Bestimmtheitsmaße von $R^2 = 0.9996$ für die vektorielle und $R^2 = 0.9998$ für die trigonometrische Berechnungsmethode errechnet, was eine gute Übereinstimmung zeigt. Ein zweiter Ansatz vergleicht die Messdaten direkt mit den Sollwerten. Die nicht-systematischen Abweichungen liegen insbesondere für die trigonometrische Rechenmethode innerhalb der Unsicherheiten der Sollgröße. Demnach konnte validiert werden, dass die Winkelmessung mit dem Messsystem durch die Verwendung der RTST-Methode im Rahmen der Validierungsunsicherheit korrekt ist.

5.4.4 Theoretische Messauflösung

Eine der entscheidenden Charakteristika des Messsystems ist die Messauflösung im Winkelraum. Diese ist sowohl durch die Auflösung des Oszilloskops als auch durch die Auflösung der LUT für die Transformation von PSD-Positionen zu Schirmpositionen begrenzt. Die LUT besitzt eine Auflösung von $5\ \mu\text{m}$; damit ist dieser Wert als Schirmposition limitierend. Örtliche Verschiebungen, kleiner als diese LUT-Auflösung, lassen sich nicht voneinander unterscheiden. Wird dieser Wert auf die gemessenen Positionen der statischen Validierung aufaddiert und anschließend erneut die Ablenkwinkel mit dem trigonometrischen Modell bestimmt, so lässt sich aus dem Unterschied eine minimale Messauflösung im Winkelraum bestimmen. Die nachfolgende Abbildung 5.17 zeigt diese Größe in Abhängigkeit des eingestellten Ablenkwinkels und der Längsachsenposition.

Wie aus dieser Abbildung ersichtlich wird, errechnet sich die minimale Auflösung zu $0,005^\circ$ bis $0,011^\circ$, abhängig vom Ablenkwinkel und der Distanz. Die Distanzabhängigkeit ist systematisch: Die Auflösung wird gering, je weiter der Schirm von der Scaneinheit entfernt ist. Dies lässt sich auf die feste Schirmgröße und -auflösung zurückführen; in großen Abständen decken die gleiche Anzahl von „Pixeln“ ein kleineres FoV des Scanners ab. Demnach ist die Auflösung bei großen Abständen besser.

Die Abhängigkeit zum Ablenkwinkel beruht auf der Verknüpfung zur Position auf dem Schirm. Große Ablenkwinkel treffen den Schirm am Rand der kalibrierten Fläche. Dort erscheint ein Pixel unter dem Einfallswinkel, weshalb dort die Auflösung steigt. Die Abhängigkeit von der Distanz überwiegt. Für ein theoretisches FoV einer Scaneinheit von ca. 35° errechnet sich bei maximalem Abstand somit eine Messauflösung von mindestens $0,005^\circ$ über den gesamten Winkelmessbereich.

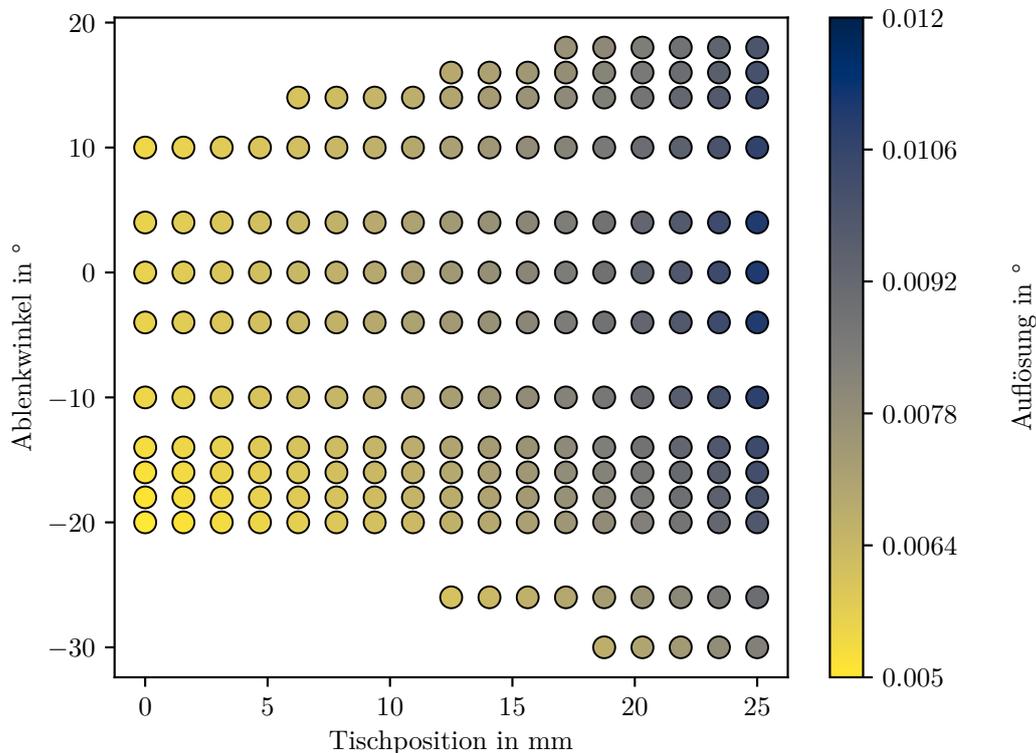


Abbildung 5.17: Minimale Messauflösung des Ablenkwinkels gegenüber der Winkeleinstellung und Längsachsenposition.

5.5 Dynamische, MEMS-basierte Validierung

In einer letzten Messreihe soll eine Scaneinheit im Betrieb vermessen und mit einer Referenzmessung verglichen werden. Neben der eigentlichen Messung der Ablenkeinheit im Messsystem wird für die Referenzmessung das FoV mit konventionellen Mitteln bestimmt. Der Vergleich gibt Auskunft darüber, ob die Ergebnisse der statischen Validierung auch unter dynamischen Bedingungen bestehen. Dieses Kapitel beschreibt die Methodik und das Vorgehen für den Vergleich mit der Referenz. Ferner werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

5.5.1 Übersicht und Methodik

An dieser Stelle wird die Konfiguration des Messsystems und die verwendete Scaneinheit beschrieben. Ferner wird auf die Referenzmessung eingegangen.

Messsystem

Zur Beurteilung der dynamischen Fähigkeiten des Messsystems wird dies so aufgebaut,

wie es in Abbildung 5.4 gezeigt ist. Der Laserstrahl wird mithilfe der zwei Umlenkspiegel so justiert, dass dieser die zu untersuchende MEMS-Scaneinheit im erwarteten Rotationspunkt mittig und parallel zur Rotationsachse trifft. Bei der Scaneinheit handelt es sich um einen MEMS-Scanner der Firma Blickfeld GmbH (beschrieben in [82]) mit einer Resonanzfrequenz von ca. 280 Hz. Abhängig von der Anregung schwingen diese im LiDAR-System mit einem FoV von 80°. Die elektronische Steuereinheit des Scanners triggert die Messung mit dem Oszilloskop, so dass aufeinanderfolgende Messungen die gleiche Anfangsbedingung besitzen. Die Auswertung erfolgt identisch zu der Beschreibung in Kapitel 5.2, indem zunächst die RTST durchgeführt wird, um die Einbautoleranzen des Scanners auszumachen, um anschließend den Ablenkwinkel über den trigonometrischen Ansatz nach Gleichung 5.6 zu berechnen. Eine Besonderheit stellt dabei der Nullpunktsstrahl dar. Da dieser nicht extra (mit stehendem Scanner) vermessen wird, muss er aus den Messdaten extrahiert werden. Dazu wird der mittlere Winkel der vektoriellen Berechnung verwendet. Dies stellt selbst bei einem schräg verbauten Scanner eine korrekte Identifikation sicher. Die Abschätzung der Messunsicherheit erfolgt analog zu dem Vorgehen der statistischen Validierung aus Kapitel 5.4.

Referenzmessung

Für die Referenzmessung soll das FoV der Scaneinheit bestimmt werden. Dazu wird ein sichtbarer, roter, kollimierter Laser zentrisch auf den Scanner gestrahlt, so dass der abgelenkte Strahl senkrecht auf die lambertsche abstrahlende Messfläche trifft. Der Scanner wird mit drei verschiedenen Anregungsamplituden mit der arbiträren Größe 300, 400 und 500 betrieben, um einen größeren Messbereich des Systems zu überprüfen. Als Messfläche wird eine konventionelle, weißgestrichene Wand in einem Abstand von 204,9 cm verwendet. Die Abstände sind so gewählt worden, dass die projizierte Linie auf der Messfläche möglichst lang und dennoch messbar ist. Der Abstand wurde mit einem Entfernungsmesser (Floureon Laser Rangefinder) bestimmt; die Standardabweichung beträgt 5 mm. Die Längenmessung erfolgte über einen Messstab mit einer Länge von 2,00 m mit einer Auflösung von 1 mm. Dieser war als Skala direkt neben der projizierten Linie angebracht war. Die Endpunkte der erzeugten Scanlinie sind mithilfe der Skala des Messstabs bestimmt worden. Aufgrund der Ausdehnung des Laserspots wurde eine Standardabweichung der Messposition von 5 mm angenommen. Der Aufbau ist in der nachfolgenden Abbildung 5.18 veranschaulicht.

Zur Berechnung des FoVs wird zunächst die Länge der projizierten Linie bestimmt und anschließend über den trigonometrischen Zusammenhang des Tangens das FoV nach Gleichung 5.26 berechnet.

$$FoV_h = 2 \cdot \arctan \left(\frac{X_{\text{ref, max}} - X_{\text{ref, min}}}{2 \cdot d_{\text{ref}}} \right) \quad (5.26)$$

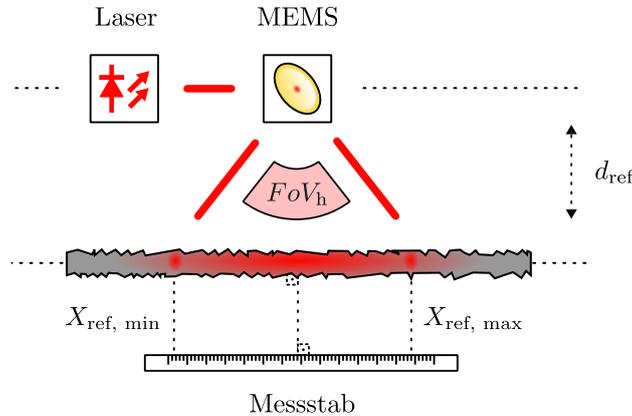


Abbildung 5.18: Aufbau der Referenzmessung zur FoV-Bestimmung mit den relevanten Größen.

Das horizontale FoV: FoV_h errechnet sich aus den beiden Positionsdaten $X_{\text{ref, min}}$ und $X_{\text{ref, max}}$ sowie dem kürzesten Abstand d_{ref} . Die Abschätzung der Messunsicherheit erfolgt erneut über eine Gaußsche Fehlerfortpflanzung. Gleichung 5.27 zeigt das Ergebnis.

$$\sigma_{FoV_h} = 4 \cdot \frac{\sqrt{(d_{\text{ref}} \cdot \sigma_{X_{\text{ref, max}}})^2 + (-d_{\text{ref}} \cdot \sigma_{X_{\text{ref, min}}})^2 + ((X_{\text{ref, min}} - X_{\text{ref, max}}) \cdot \sigma_{d_{\text{ref}}})^2}}{4 \cdot d_{\text{ref}}^2 + (X_{\text{ref, max}} - X_{\text{ref, min}})^2} \quad (5.27)$$

Zu den Parametern aus Gleichung 5.26 kommen hierbei die Standardabweichungen für die Eingangsgrößen hinzu. Diese sind mit σ gekennzeichnet; die Indizes beschreiben, zu welcher Eingangsgröße sie zugehörig sind.

5.5.2 Ergebnisse der dynamischen Messung des Messsystems

Aus den Messreihen bei den drei Anregungsamplituden 300, 400 und 500 lassen sich aus den aufgenommenen PSD-Spannungen die PSD-Positionen, die Schirm-Positionen und letztlich die Ablenkwinkel mittels RTST bestimmen. Diese Kapitel zeigt die Zwischenergebnisse für die dynamische Messung und schließt mit den berechneten Ablenkwinkeln.

PSD- und Schirmposition

Die nachfolgende Abbildung 5.19 zeigt beispielhaft die PSD-Spannungen, PSD-Positionen

und Schirmpositionen gegenüber der Zeit für eine Schlittenposition von 18 mm bei einer Anregungsamplitude von 400.

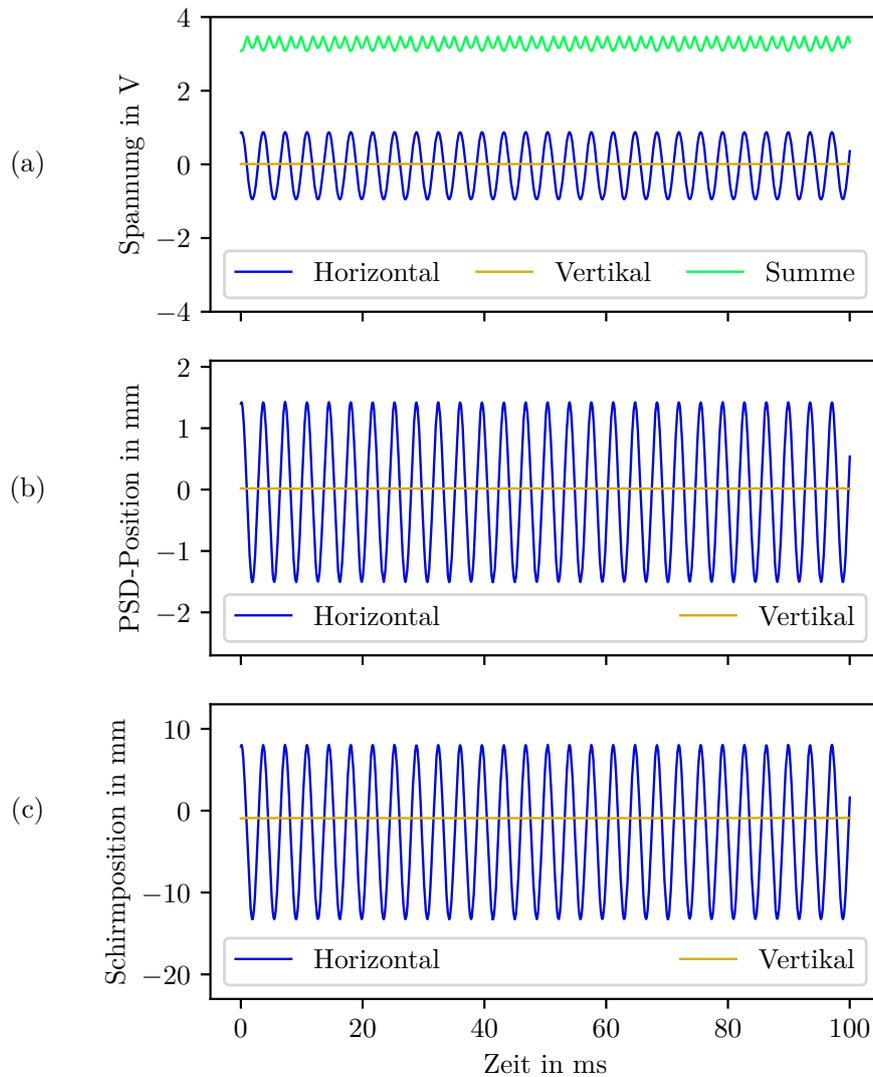


Abbildung 5.19: Ergebnisse der dynamischen Messung mit einer Anregungsamplitude von 400 bei einer Schirmdistanz von 18 mm: (a) PSD-Spannungen, (b) PSD-Positionen, (c) Schirmpositionen.

Wie aus Abbildung 5.19 (a) ersichtlich ist, sind alle drei PSD-Spannungen für den eingestellten Bereich dynamisch aufgezeichnet worden. Da die Scaneinheit eine Strahlablenkung entlang der horizontalen Achse erzeugt, zeigt das Signal dieses Kanals (u-Achse) die größte Abhängigkeit. Es oszilliert mit einer Amplitude von ca. 1 V. Während das Signal es vertikalen Kanals nahezu konstant ist, kann im Summensignal ebenfalls eine dynamische, sich wiederholende Oszillation ausgemacht werden. Dies ist zu erwarten, da die Abstrahlung

des Schirms mit steigendem Ablenkwinkel immer weiter von der optischen Achse der PSD-Kamera entfernt ist und somit auch weniger Licht in Richtung des Sensors gestrahlt wird. Beim Nulldurchgang des Scanners erreicht das Summensignal sein Maximum, weshalb die Wiederholperiode hier halb so groß ist wie die des horizontalen Signals. Letztlich ist diesem Graphen zu entnehmen, dass das Summensignal an der oberen Grenze des empfohlenen Bereichs von $\leq 4\text{ V}$ liegt [124] und somit für alle Ablenkwinkel des Scanners genug Licht auf die PSD abgebildet wird.

Die Umrechnung in eine PSD-Position nach 5.3 erzeugt die Graphen in (b) der Abbildung 5.19. In dieser Skalierung der Darstellung ist keine Oszillation im vertikalen Messkanal ersichtlich, was dafür spricht, dass die Ablenkrichtung der Scaneinheit korrekt zum Sensor ausgerichtet ist. Die horizontale Position oszilliert dabei mit der gleichen Frequenz wie das ursprüngliche horizontale Spannungssignal der PSD. Die Amplitude beträgt in diesem Fall ca. 1,6 mm; eine Verschiebung der Nulllinie ist erkennbar. Solch eine unsymmetrische Oszillation entsteht durch einen statischen Winkel der Scaneinheit. Dieser Winkel wird durch die RTST bestimmt und in der Berechnung des Ablenkwinkels berücksichtigt. Durch Ableitung des horizontalen Positionssignals errechnet sich für diese Messung eine maximale Geschwindigkeit von $3,2\text{ m s}^{-1}$ auf der PSD. Die maximale Geschwindigkeit, über alle Messreihen trat bei einer Anregungsamplitude von 500 auf und ergab $3,4\text{ m s}^{-1}$, was deutlich unter dem Grenzwert der Literatur von $104,72\text{ m s}^{-1}$ liegt [111]. Die PSD wird demnach im richtigen Funktionsbereich betrieben und es können auch schnellere Ablenkeinheiten verwendet werden.

In (c) der gleichen Abbildung 5.19 ist letztlich der bestimmte zeitliche Verlauf der Schirmposition dargestellt. Die Oszillation erstreckt sich über ca. 20 mm und zeigt eine Ursprungsverschiebung von ca. 3 mm. Die gemessene Schirmpositionen sind innerhalb des kalibrierten Messbereichs.

Bestimmung des Längs- und Querabstands

Die aus den PSD-Positionen berechneten Schirmpositionen erlauben in einem dritten Schritt die Bestimmung der Einbautoleranzen der Scaneinheit mittels RTST. Um diese zu berechnen, wird zunächst der statische Winkel als Mittelwert der vektoriellen Winkelmethodik aus der Steigung der Geraden bestimmt. Ein Strahl mit jener Steigung, der durch einen gemittelten Offset am Schirm trifft, dient als Basisgerade für die Ermittlung der Schnittpunkte und somit den beiden Toleranzparametern des Quer- und Längsabstands. Die verwendeten Daten wurden auf $\pm 6\text{ mm}$ um den Median herum begrenzt, um Ausreißer herauszufiltern. Die bestimmten Größen des Längsabstands für alle Anregungsamplituden sind in Form von Histogrammen für alle Strahlen der Anregungsamplitude in Abbildung 5.20 dargestellt.

Wie aus der Abbildung 5.20 ersichtlich ist, sind die berechneten Längsabstände für alle

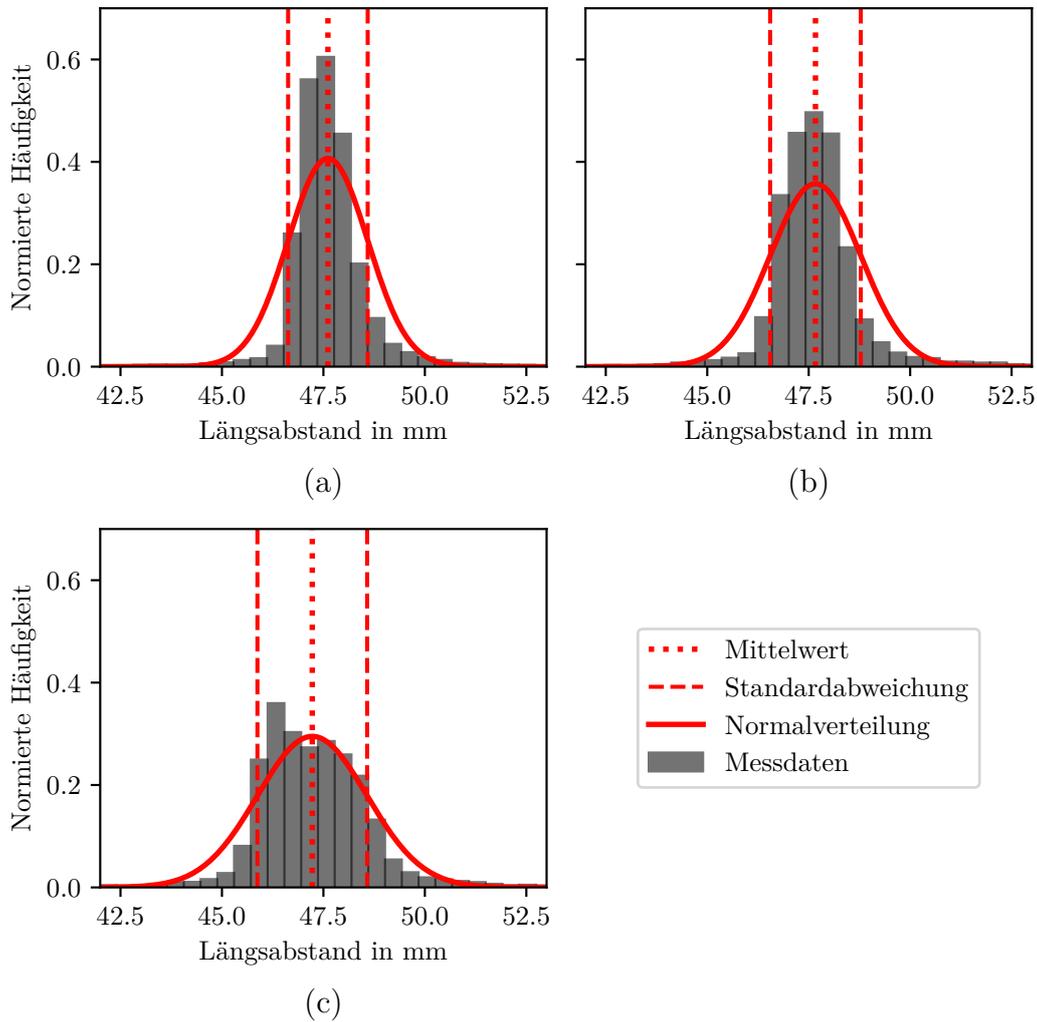


Abbildung 5.20: Histogramme des Längsabstands durch die RTST mit Normalverteilung für Anregungsamplituden von: (a) 300, (b) 400 und (c) 500. Die rote vertikale Markierung zeigt den Mittelwert, die gestrichelten Linien markieren die Standardabweichung.

Anregungsamplituden annähernd normalverteilt. Die Abweichung der Amplitude kommt durch die bestimmte Begrenzung des Datensatzes. Aufgrund der Ähnlichkeit zur Normalfunktion wird der Längsabstand aus dem arithmetische Mittelwert berechnet. Die Unsicherheit des Längsabstands wird aus der Streuung und somit als Standardabweichung der Normalverteilung definiert. Die Verteilungen des Querabstands ähneln denen des Längsabstands. Aus diesem Grund wird für die Bestimmung des Parameters analog vorgegangen.

Eine Übersicht der sich ergebenden Toleranzparameter des statischen Winkels, Längsabstands und Querabstands ist in Tabelle 5.3 für die drei untersuchten Anregungsamplituden aufgelistet.

Tabelle 5.3: Ergebnisse der RTST-Messungen für drei Anregungsamplituden

Anregungs- amplitude	Statischer Winkel in °	Längsabstand in mm	Querabstand in mm
300	$-0,27 \pm 0,12$	$47,6 \pm 1,0$	$-2,836 \pm 0,005$
400	$-0,06 \pm 0,28$	$47,7 \pm 1,2$	$-2,7004 \pm 0,0013$
500	$-0,7 \pm 0,7$	$47,2 \pm 1,4$	$-2,870 \pm 0,018$

Die aufgezeigten Ergebnisse der Toleranzparameter ähneln sich für verschiedene Anregungsamplituden. Für den statischen Winkel ergibt sich für alle Anregungsamplituden ein kleiner negativer Winkel, kleiner 1° . Der Längsabstand und damit die Distanz zwischen dem Rotationszentrum der Ablenkung errechnet sich zu ca. 47,5 mm. Die große Unsicherheit von ca. 1 mm ist der Schnittpunkts-Methodik geschuldet. Die Abweichung des Querabstand (X_D) zwischen den verschiedenen Anregungsamplituden ist maximal ca. 200 μm bei Standardabweichungen von ca. 18 μm . Absolut gesehen passt diese Abweichung des Querabstands zu der des Längsabstands im Bereich von eigen 100 Mikrometern. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die bestimmten Parameter für die verschiedenen Anregungen identisch sind, da die Scaneinheit zwischen den Messungen nicht verändert worden ist. Außerdem ist zu erwarten, dass die bestimmte Messunsicherheit mit steigender Anregungsamplitude und damit auch weniger Stützstellen entlang der Z-Achse größer wird. Mit Ausnahme des Querabstands bei der Anregung von 400 sind beide Erwartungen erfüllt. Die Abweichungen untereinander werden an dieser Stelle nicht weiter untersucht, da die Messung des Ablenkwinkels die eigentliche Aufgabe des Systems darstellt und diese im Laufe dieses Kapitel direkt validiert und beurteilt werden. Für die weitere Bestimmung des Ablenkwinkels werden die Werte aus der Tabelle 5.3 verwendet.

Bestimmte Ablenkwinkel

Aus den Ergebnissen der RTST der Tabelle 5.3 werden mittels Gleichung 5.6 die Ablenkwinkel für alle Datensets bestimmt. Ein Beispiel für die sich ergebenden Winkel ist in Abbildung 5.21 für die Anregungsamplitude von 400 gegenüber der Zeit dargestellt.

Aus (a) zeigt sich, dass der mittlere Ablenkwinkel aus allen Distanzen mit konstanter Amplitude symmetrisch oszilliert. Die sich ergebende Streuung für die Ablenkwinkel bei verschiedenen Abständen ist in (b) und (c) detaillierter dargestellt. Eine Systematik zu der zugehörigen Distanz kann in beiden Fällen nicht ausgemacht werden. Die Abweichung im Nulldurchgang aus (b) der Abbildung 5.21 zeigt eine kleinere maximale Abweichung von ca. $0,1^\circ$. Die in Form eines Korridors gezeigte Standardabweichung beträgt für alle Abstände ca. $\pm 0,3^\circ$ im Nulldurchgang. Das Maximum in (c) zeigt zum einen das Rauschen der Messung und zum anderen die Abweichung untereinander. Diese beträgt im Extremfall ca. $0,2^\circ$. Die Standardabweichung steigt hier auf ca. $\pm 1,0^\circ$ an.

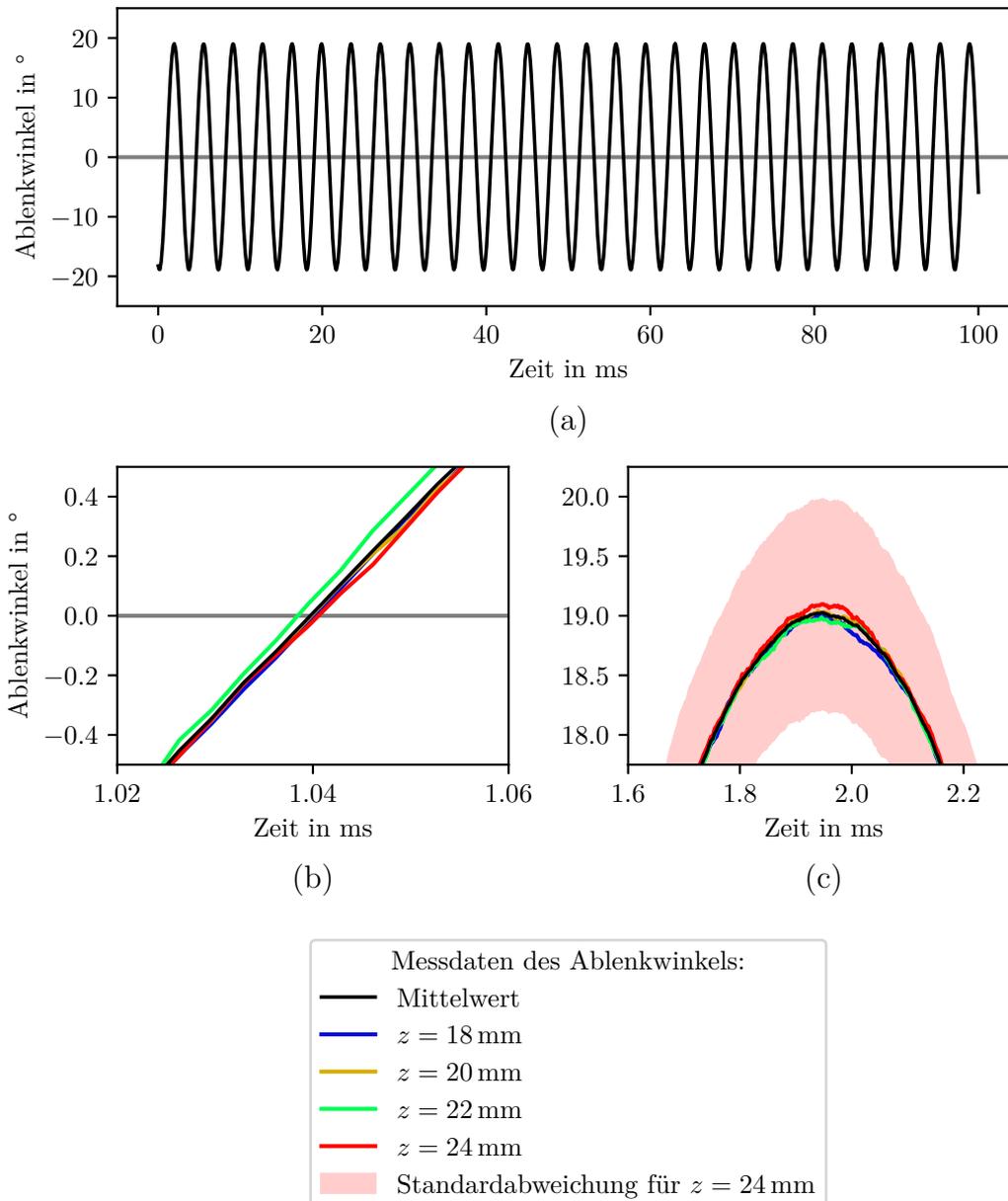


Abbildung 5.21: Ablenkswinkel gegenüber der Zeit bei einer Anregungsamplitude von 400 für: (a) den gemittelten Ablenkswinkel über alle Distanzen, (b) den ersten Nulldurchgang für alle Distanzen und (c) das erste Maxima für alle Distanzen. Die berechneten Standardabweichungen sind in (b) und (c) als farblicher Korridor hinterlegt.

Vergleich der Ablenkswinkel bei verschiedenen Anregungen

Abschließend sollen die absoluten Ablenkswinkel für beide Methoden und für die drei Anregungsamplituden verglichen werden. Abbildung 5.22 zeigt beispielhaft drei Perioden der Oszillationen für die drei Anregungsamplituden und beide Berechnungsmethoden.

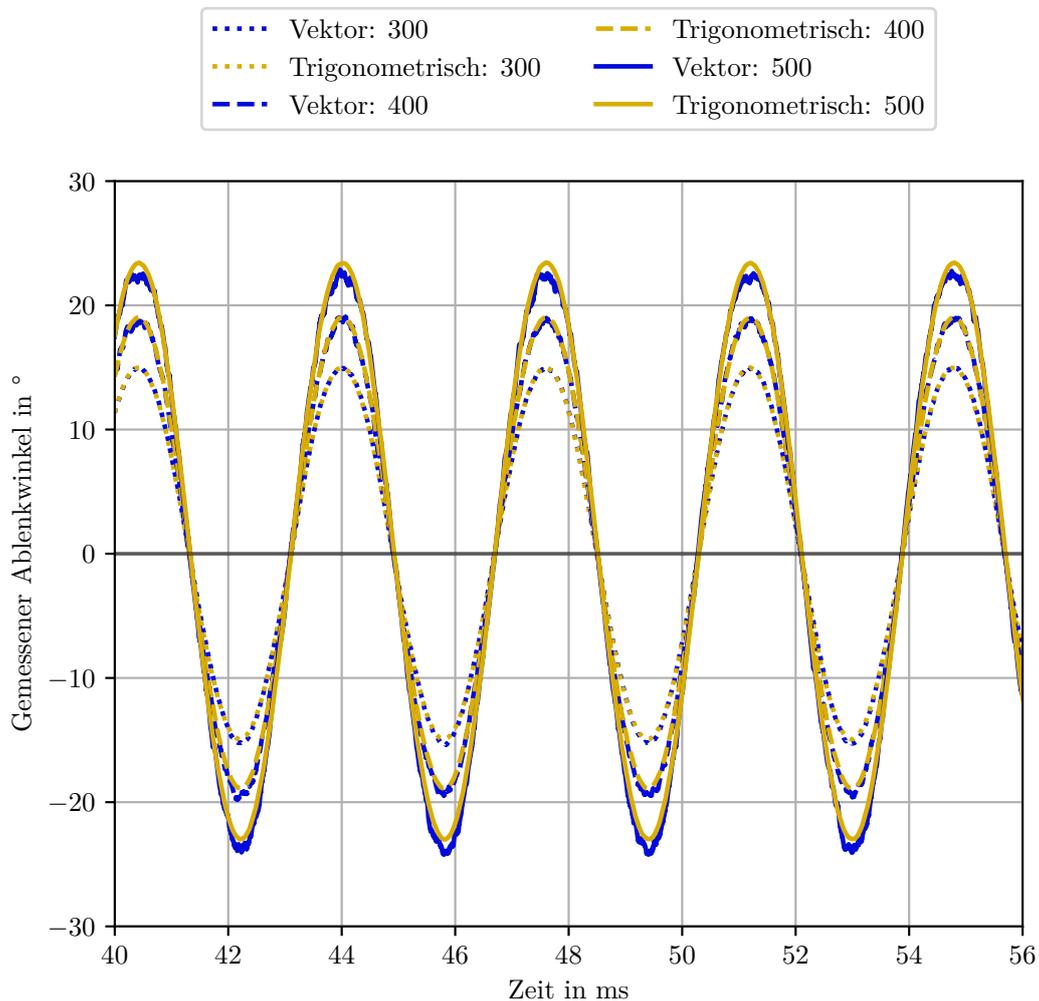


Abbildung 5.22: Ablenkwinkel aus der vektoriellen und der trigonometrischen Berechnung für alle Anregungsamplituden (basierend auf [149]).

Ersichtlich ist, dass die Schwingungsamplitude mit steigender Anregungsamplitude zunimmt. Ferner zeigt sich, dass die vektorielle und trigonometrische Berechnungsmethode qualitativ übereinstimmen. Die größten Abweichungen zwischen diesen finden sich in den Maxima, insbesondere für die größte Anregungsamplitude von 500. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die vektorielle Methode bei hohen Anregungsamplituden mit wenigen Stützstellen arbeitet und somit große Unsicherheiten beinhaltet. Kleinste Störungen in der Scannung oder der Messung finden sich deshalb direkt im Graph wieder. Diese Beobachtung zeigt somit auch, dass es nicht ausreicht, die Winkel mithilfe der vektoriellen Methode zu bestimmen. Die trigonometrische Methode ist für die dynamischen Signale deutlich besser geeignet.

Stabilität der Ablenkung

Für jede Anregungsamplitude und jeden Schirmabstand sind eine Vielzahl von Oszillationen aufgezeichnet worden. Die Analyse der Abweichung der verschiedenen Oszillationen zueinander gibt einen Hinweis über die Stabilität der Scannung der Ablenkeinheit selbst. Zu diesem Zweck sind die trigonometrisch-berechneten Ablenkwinkel für verschiedene Abstände gemittelt worden. Anschließend sind die einzelnen Perioden via Nulldurchgangsdetektion überlagert und gemittelt worden. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.23 beispielhaft für eine Anregungsamplitude von 400 für einer Tischposition von 18 mm gezeigt.

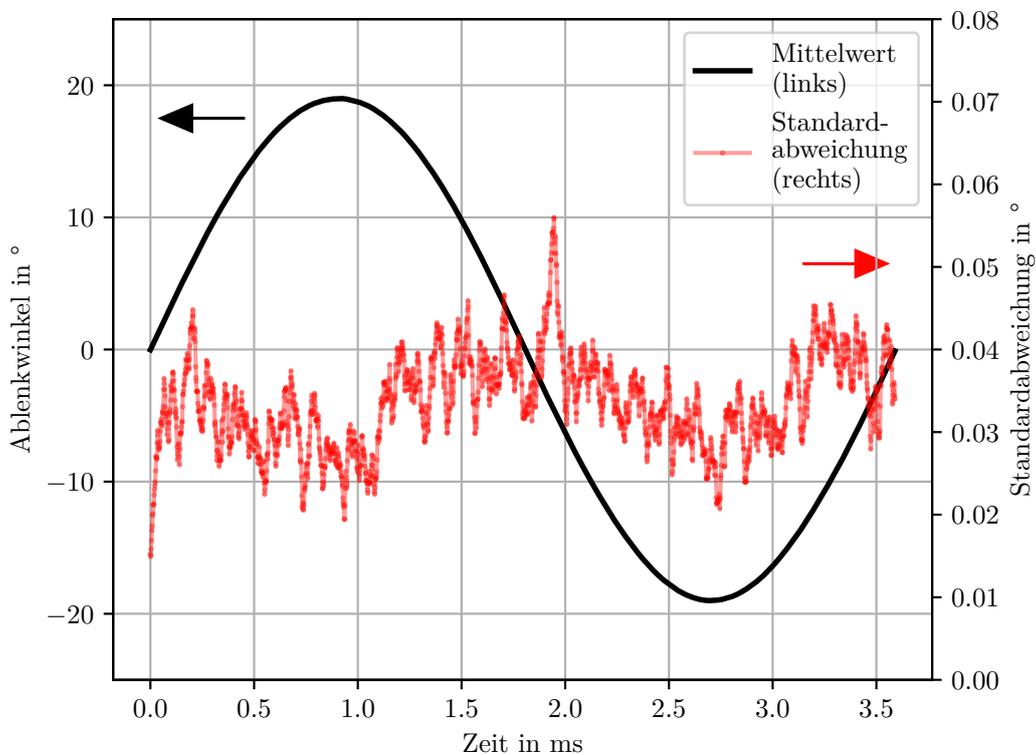


Abbildung 5.23: Mittelwert und Messabweichung für eine Periode über alle Daten für eine Anregungsamplitude von 400 bei der Tischposition von 18 mm.

Der gemittelte Ablenkwinkel, dessen Ordinate auf der linken Seite zu sehen ist, schwingt sinusförmig mit einer Amplitude von ca. 19° . Die Ordinate der dargestellten Abweichungen befindet sich rechts. Die Standardabweichung (rot) ist über die gesamte Periode annähernd konstant ($< 0,06^\circ$). Eine Systematik lässt sich nicht ausmachen. Die geringe Standardabweichung zeigt, dass die Scannung der Ablenkeinheit wiederholbar ist und die verwendete Methodik des RTST deshalb geeignet ist. Dies ermöglicht die Absolutmessung von Ablenkwinkeln.

5.5.3 Vergleich des horizontalen FoVs mit der Referenz

Dieses Kapitel behandelt abschließend die dynamische, MEMS-basierte Validierung des Messsystems. Für eine Beurteilung wird das maximale horizontale FoV der Messungen mit der Referenz verglichen.

Bestimmung des horizontalen FoV

Für die Validierung des dynamischen Verhaltens wird der maximale Ablenkbereich, also das absolute horizontale FoV, verglichen. Für die trigonometrische Berechnungsmethode sind dazu die Ablenkwinkel über die verschiedenen Abstände entlang der Z-Achse gemittelt worden. Aus den sechs Datensätzen wird schließlich das Maximum und das Minimum über die gesamte Messdauer (27 Perioden) bestimmt und aus dem Unterschied das maximal erreichte FoV errechnet. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 5.4 aufgelistet. Wie in Kapitel 5.5.1 beschrieben wurde, sind für alle drei Anregungsamplituden die maximalen Längen der projizierten Linien vermessen worden. Der Abstand ist zwischen den Messungen nicht verändert worden; er beträgt $204,9 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$. Die berechneten horizontalen FoV sind in der nachfolgenden Tabelle 5.4 aufgelistet. Die Standardabweichung der Unsicherheit entspricht der maximalen Unsicherheit einer Einzelmessung nach Gleichung 5.27.

Tabelle 5.4: Ergebnisse des horizontalen FoV für alle Anregungsamplituden für die vektorielle und trigonometrische Berechnung im Vergleich zur Referenz.

Anregungsamplitude	Vektoriell FoV in °	Trigonometrisches Fov in °	FoV der Referenz in °
300	$30,45 \pm 0,22$	$30,05 \pm 0,23$	$30,31 \pm 0,20$
400	$39,3 \pm 0,6$	$38,1 \pm 0,6$	$38,57 \pm 0,20$
500	$47,7 \pm 1,3$	$46,6 \pm 1,1$	$46,54 \pm 0,20$

Die Ergebnisse aus dieser Tabelle sind untereinander stimmig; sie zeigen ähnliche Ergebnisse. Für alle Anregungsamplituden sind die FoV aus der trigonometrischen Berechnung immer kleiner als die der vektoriellen. Es fällt ebenfalls auf, dass die Unsicherheiten für beide Methoden mit steigender Anregungsamplitude zunehmen. Dieser Umstand ist für die vektorielle Bestimmung bereits behandelt worden. Für die trigonometrische Berechnung liegt dies an der Tatsache, dass die beiden Toleranzparameter der Quer- und Längsabstände aus den RTST durch die geringere Datenbasis eine größere Unsicherheit aufweisen. Dies ist auch in Tabelle 5.3 ersichtlich. Insbesondere der Längsabstand, also der Abstand zwischen dem Rotationsursprung und der maximalen Schirmposition, ist in diesem Fall relevant. Die Ergebnisse der trigonometrischen Methode stimmen mit der Referenzmessung überein. Eine detaillierte Untersuchung erfolgt im nächsten Abschnitt anhand der Unterschiede.

Diskussion zur dynamischen, MEMS-basierten Validierung

Der Vergleich der Ergebnisse aus der Tabelle 5.4 ist in Form der Differenz für alle Anregungsamplituden und beide Bestimmungsmethoden in Abbildung 5.24 dargestellt.

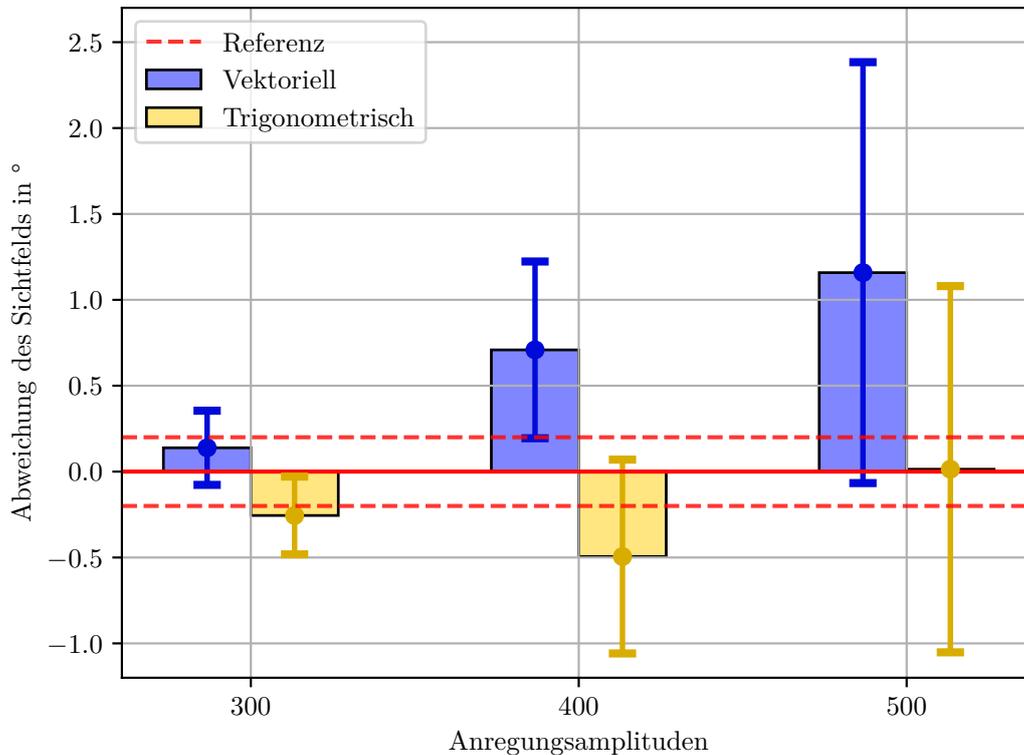


Abbildung 5.24: Unterschied der Ablenkwinkel zwischen dem Messsystem und der Referenzmessung für drei verschiedene Anregungsamplituden (basierend auf [149]).

Wie aus der Abbildung 5.24 hervorgeht, gibt es sowohl für die vektorielle als auch die trigonometrische Berechnungsmethode für alle Anregungsamplituden einen Überlagerungsbereich in der Standardabweichung der Referenzmessung. Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse der trigonometrischen Berechnung dabei in allen Fällen besser mit der Referenzmessung übereinstimmen. Die absolute Abweichung der vektoriellen Methode steigt mit steigender Anregungsamplitude auf bis zu ca. $1,2^\circ$. Die zugehörigen Abweichungen für die trigonometrische Bestimmung weisen keine Systematik auf. Die größte Abweichung ist ca. $0,5^\circ$; bei einem Referenz-Sichtfeld von $38,57^\circ$ entspricht das einer relativen Abweichung von 1,2%. Der Unterschied zu den in [149] beschriebenen 1% liegt darin begründet, dass diese Arbeit einen größeren Datensatz analysiert. Die bestimmten Unsicherheiten beider Berechnungsmethoden sind in ihrer Größe vergleichbar. Für beide Methoden steigen sie mit zunehmender Anregungsamplitude.

Zusammengefasst liefert die trigonometrische Berechnung mit Hilfe des RTST bessere Ergebnisse als die vektorielle Bestimmung. Die Unsicherheiten sind hauptsächlich den

breiten Verteilungen des Längsabstands geschuldet und können durch optimierte Pivot-Punkt-Bestimmung und eine gezielte Wahl der Stützstellen verbessert werden.

Kapitel 6

Diskussion der Forschungsergebnisse

Diese Kapitel behandelt abschließend die Ergebnisse des Messstands und stellt sie in den Kontext der Anforderungen und des Stands der Technik. Ferner werden mögliche Designoptimierungen und -abwandlungen beschrieben.

6.1 Messsystemspezifikation in Bezug auf die Anforderungen

Nachdem Kapitel 5 das Messsystem, die Kalibration und Validierungen aufgezeigt hat, wird hier dargestellt, wie die Ergebnisse zu interpretieren sind und was diese für die Eigenschaften des Messsystems bedeuten. Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht der Anforderungen und Ergebnisse des Messstands mit farblicher Hervorhebung für erreichte Anforderungen. Die aufgestellten, relevanten Charakteristiken werden diskutiert und letztlich gegen den aufgezeigten Stand der Technik verglichen.

Tabelle 6.1: Anforderungen und erreichte Größen für verschiedene Charakteristiken des Messsystems.

Charakteristik	FoV_h	Relative Genauigkeit von FoV_h	Auflösung	Bandbreite	Abtastrate
Einheit	°	%	°	kHz	kHz
Anforderung	41	-	0,008	2,25	4,5
Messstand	47	1,2	0,005 – 0,011	15	≈ 300

6.1.1 Erkenntnisse aus der statischen Validierung

Aus den Messungen mit dem Rotationstisch aus Kapitel 5.4 lassen sich Aussagen über die Auflösung, das absolute Sichtfeld sowie die Linearität und Genauigkeit machen.

Auflösung

Wie während der statischen Kalibrierung gezeigt wurde, lässt sich die minimale Auflösung des Systems auf die LUT-Diskretisierung der Schirmposition zurückführen. Bei der hier verwendeten Auflösung von $5\ \mu\text{m}$ errechnet sich so eine minimale Winkelauflösung von $0,005^\circ$ bis $0,011^\circ$. Diese ist abhängig vom Ablenkwinkel und der Messdistanz des Detektors. Die beste Auflösung errechnet sich für große Ablenkwinkel bei großen Distanzen.

Die Anforderung von $0,008^\circ$, welche aus der halben Winkelauflösung des LiDARs abgeleitet worden ist, kann somit in bestimmten Messpositionen erreicht werden. Insbesondere für das Ziel-Sichtfeld von 41° können viele Messabstände angefahren werden, die mindestens eine Auflösung von $0,008^\circ$ erreichen. Da diese Anforderung unter bestimmten Bedingungen erreicht wurde, ist das Feld in Tabelle 6.1 gelb markiert.

Absolutes Sichtfeld

Eine zweite Aussage, die aus den Messungen der statischen Validierung getroffen werden kann ist, dass die Anforderung des zu vermessenden absoluten Sichtfelds (FoVs) erreicht wird. Nach Kapitel 4.4.3 sollte dieses genau wie in den Anforderungen an das LiDAR-System selbst mindestens 41° betragen.

In der Beschreibung der Messergebnisse der statischen Validierung aus Kapitel 5.4.3, insbesondere aus der relativen Darstellung der Linearitätsbetrachtung (Abbildung 5.14), geht hervor, dass der maximale Messbereich mindestens 47° beträgt. Dies übersteigt die Anforderungen um mehr als 25 %, weshalb das Feld in Tabelle 6.1 grün markiert ist.

Linearität und Genauigkeit

Aus der statischen Validierung geht ebenfalls hervor, dass das Messsystem über den gesamten Messbereich linear ist und somit der gemessene mit einem erwarteten Ablenkwinkel übereinstimmt. Die Residuen des relativen Ablenkwinkels betragen bei der trigonometrischen Berechnung maximal ca. $0,5^\circ$.

Die Standardabweichung der Messunsicherheit wurden durch die Gaußschen Fehlerfortpflanzung für beide Berechnungsmethoden bestimmt. Für die trigonometrische Berechnung sind alle Messergebnisse innerhalb der Messungenauigkeit der Referenz von $\pm 0,5^\circ$. Somit lässt sich festhalten, dass die bestimmten Ablenkwinkel des Messsystems im gesamten Messbereich im Rahmen der Messungenauigkeit mit der Referenz übereinstimmen.

6.1.2 Erkenntnisse aus der dynamischen Validierung

Aus den Messungen mit dem MEMS-Scanner aus Kapitel 5.5 lassen sich Schlussfolgerungen über die Dynamik und das absolute Sichtfeld ziehen.

Dynamik

Der aufgenommene zeitliche Verlauf einer Teilmessung ist in Abbildung 5.21 dargestellt. Diese Schwingung deutet qualitativ auf einen Sinusverlauf hin, welcher für die verschiedenen Anregungen, Abstände und über mehrere Perioden konsistent ist. Das Messsystem ist demnach in der Lage, die Oszillation von MEMS-Ablenkeinheiten zeitlich korrekt aufzunehmen. Die Anforderungen an die Bandbreite und Abtastrate aus Tabelle 6.1 wurden im Design erreicht; die Zellen sind in grün markiert.

Angelehnt an den Stand der Technik zu der Dynamik von PSDs aus [111], lässt sich aus den vermessenen Oszillationen eine maximale Ablenkgeschwindigkeit beim Nulldurchgang von bis zu $3,4 \text{ m s}^{-1}$ errechnen (Kapitel 5.5.2). Diese ist kleiner als das von [111] bestimmte Limit von $104,72 \text{ m s}^{-1}$, was die Verwendung der PSD für dynamische Zustände rechtfertigt.

Absolutes Sichtfeld

Die dynamischen Messungen des MEMS-Scanners bei drei verschiedenen Anregungsamplituden ließen durch die hier bezeichnete RTST-Methode Rückschlüsse auf dessen Orientierung schließen. Für alle drei Anregungen finden sich die konsistente statische Winkel, Längs- und Querabstände. Die Verwendung der RTST-Methode zur Berechnung des Ablenk winkels mit der hier genannten „trigonometrischen Methode“ liefert außerdem Ablenk winkel und FoVs, die mit der vektoriellen und der Referenzmessung übereinstimmen. Die großen Unsicherheiten von bis zu 1° für die trigonometrische Bestimmung sind auf die Messunsicherheiten im Längsabstand zurückzuführen, welche durch optimierte Methoden verbessert werden können. Die Nützlichkeit und Funktionalität der RTST-Methode wurde veranschaulicht.

Eine weiterer Umstand, der aus den Referenzmessungen hervorging, bezieht sich auf das gemessene FoV bzw. Sichtfeld. Im Vergleich zwischen der Referenz und der trigonometrischen Messung zeigen sich nur geringe Unterschiede von maximal $0,5^\circ$ (1,2%, Tabelle 6.1) im Rahmen der Messunsicherheit. Da die Linearität in der statischen Validierung bestätigt, hier zusätzlich drei Stützpunkte unter dynamischen Bedingungen validiert wurden und die Nutzung des Sensors innerhalb des beschriebenen Arbeitsbereichs ist [111], lässt sich schlussfolgern, dass das hier vorgestellte Messsystem zur Bestimmung von dynamischen Ablenk winkeln fähig ist.

6.1.3 Vergleich mit dem Stand der Technik

Wie in Kapitel 5.1.3 beschrieben wurde, sind insbesondere die beiden Systeme [44, 141] im Kontext relevant. Die Charakteristiken werden an dieser Stelle mit dem hier vorgestellten System verglichen.

Das beschriebene System von Fujita et al. [44], basierend auf einer PSD mit zentrischem Loch, konnte Sichtfelder von $\pm 6^\circ$ mit einem RMS-Fehler von $\pm 0,21^\circ$ erreichen. Das hier entworfene Messsystem weist Standardabweichungen in der selben Größenordnung $< 1^\circ$ auf. Im Gegensatz zu dem System von Fujita et al. können hier allerdings Sichtfelder von bis zu 47° vermessen werden, wie aus der statischen Validierung hervorging.

Das Messsystem von Yoo et al. [141] zur Vermessung von MEMS-Scannern hatte eine Sichtfeld von $\pm 15^\circ$ und wies eine Messgenauigkeit von $0,026^\circ$ auf. Die hohe Genauigkeit ist dem hier vorgestellten Messsystem überlegen. Dazu muss jeder zu vermessende MEMS-Scanner allerdings mithilfe der Justageeinrichtung individuell eingestellt werden. Im Vergleich ist das hier vorgestellte System nicht auf einen solchen Prozess angewiesen, da die Einbauorientierung und -position durch die RTST-Methode während der Messung bestimmt werden. Das führt zu einer höheren Automatisierbarkeit und langfristig zu einer schnelleren Charakterisierung. In Bezug auf das Sichtfeld überschreitet das neue Messsystem das von Yoo et al. und erlaubt somit auch die Charakterisierung von Leistungsstärkeren MEMS-Scannern in der Zukunft.

6.2 Designvarianten und Optimierungspotential

Nachdem die Fähigkeiten des Messsystems final aufgezeigt worden sind, wird im folgenden beschrieben, welche Optimierungsmöglichkeiten bestehen und welche Systemabwandlungen für angrenzende Anwendungen nahe liegen.

6.2.1 Optimierungspotential und theoretische Limitierung

Um noch anspruchsvollere Anforderungen abdecken zu können, lässt sich das beschriebene System zukünftig in vielerlei Hinsicht verbessern. Im Besonderen stehen dabei die oben beschriebenen Charakteristika im Fokus. Wie diese Leistungsparameter durch individuelle Bestandteile optimiert werden können, ist in diesem Kapitel für die Laserquelle, den Diffusor und die Detektionsoptik beschrieben. Zusätzlich wird auf die theoretische Limitierung des Systems eingegangen.

Laserquelle

Die erste Komponente des Systems, die optimiert werden kann, ist der Laser. Der hier

verwendete Diodenlaser ist aufgrund der Technologie begrenzt: Er liefert eine hohe CW-Leistung, besitzt aber auch ein inhomogenes Feld. Die Verteilung ist multimodal und zeigt hot-spots. Da PSD-Sensoren den gewichteten Schwerpunkt der optischen Strahlung bestimmen, befindet sich dieser für ein solches Feld nicht im Zentrum. Insbesondere für große Ablenkwinkel können solche Effekte zu zusätzlichen Verzeichnungen führen, die eine komplizierte Kalibrierung erfordern würden. Zur Optimierung lassen sich fasergekoppelte DFB-Laser verwenden, die neben den hohen Leistungen auch eine monomode-Gauß-Intensitätsverteilung besitzen. Zudem sind diese Laser temperaturstabilisiert, was zu reproduzierbaren Messungen führt.

Zusätzlich sollte die Feldgröße auf ein Minimum reduziert werden, um Randeffekte am PSD-Sensor zu vermeiden und so die nutzbare Fläche größtmöglich zu verwenden. Dabei ist auf eine ausreichende Kollimierung und auf die Intensitäts-Zerstörschwelle der PSD zu achten. Als minimaler Durchmesser werden von Thorlabs z. B. 0,2 mm angegeben [124].

Optischer Diffusor

Der optische Diffusor wird als Schirm zur Abbildung des Laser verwendet. Dieser weißt in der aktuellen Konfiguration im besten Fall eine lambertsche Streucharakteristik ohne optische Verluste auf. Dies bedeutet, dass das einfallende Laserlicht - unabhängig unter welchem Winkel dieses auftrifft - senkrecht und symmetrisch zur Oberfläche in den Halbraum abgestrahlt wird. Außerdem fällt die Strahlstärke nach dem Schirm mit dem Kosinus des Winkels ab. Spekulare Transmission (Transmission mit dem Winkel des einfallenden Strahls) führt zu einem höheren Lichtleistungsgradienten auf dem Sensor, was zu einem eingeschränkten FoV führt, da der dynamische Bereich der PSD verlassen wird. Technisch lässt sich dies insbesondere mit holografischen Diffusoren erreichen [88].

Eine alternative zu einem transitiven, geraden Schirm kann ein gekrümmter Schirm sein, der in Reflexion genutzt wird. Ähnlich zu der „Imaging Sphere“ aus Kapitel 5.1.2 könnte der Schirm sphärisch gekrümmt sein. Mit einem zentrisch positionierten Detektionspfad verbessert dies die Signalstärke für große FoVs, da die maximale Abstrahlrichtung des Schirms immer zum Detektor zeigt. Limitiert ist diese Konfiguration zum einen durch die Machbarkeit der Fertigung und zum anderen durch die Empfindlichkeit der Signalstärke gegenüber Verschiebungen.

Detektionsoptik und PSD

Abgeleitet von der Näherung des photometrischen Entfernungsgesetz sinkt die empfangene Lichtleistung, abgestrahlt von einem lambertschen Quelle im Winkel ϕ mit $\cos(\phi)^4$ [31]. Dies trifft näherungsweise auch auf dieses System zu. Für große MEMS-Ablenkwinkel und damit äußere Schirmpositionen sinkt die empfangene Leistung. Demnach ist der Beobachtungswinkel (das FoV der Kamera) durch einen möglichst großen Abstand zwischen

Schirm und Kamera zu reduzieren, um innerhalb den dynamischen Leistungsbereich der PSD zu bleiben. Dies kann durch eine Optimierung der verschiedenen Abstände zwischen Ablenkeinheit, Schirm und Detektionseinheit geschehen. Zu beachten ist, dass mit größer werdendem Abstand die Notwendige maximale Leistung des Lasers quadratisch ansteigt. Die abbildende Optik sollte aus möglichst wenigen, asphärischen Elementen bestehen und dadurch eine hohe Transmission mit geringen Abbildungsfehlern aufweisen. Dies minimiert die notwendigen Modellparameter in der Optimierung. Die PSD selbst könnte durch einen duo-lateralen Typen mit größerer sensitiver Fläche ersetzt werden. Ein angepasster TIA kann die Bandbreite zusätzlich erweitern. Für eindimensional Messungen können auch 1D-PSDs verwendet werden, was zusätzlich den Kalibrieraufwand in der vertikalen Achse limitiert.

6.2.2 Designvarianten des Messsystems

Das beschriebene Messsystem lässt sich durch verschiedene Änderungen abwandeln, so dass zusätzliche Charakteristika vermessen werden können. Zwei denkbare Varianten sind ein 2D-Messsystem und die intrinsischen Kalibration.

2D-Messsystem

Das hier vorgestellte System ist bereits jetzt in der Lage, sowohl den horizontalen Ablenkwinkel, als auch den vertikalen Ablenkwinkel zu bestimmen, da die Kalibration entlang zwei Achsen durchgeführt worden ist. Dies erlaubt demnach auch die Evaluierung vertikalen Auslenkungen der Scaneinheiten. Dies hilft in der Entwicklungsphase von Reglern und in der Qualitätskontrolle nach der Fertigung.

Basierend auf dieser Tatsache kann das System theoretisch auch genutzt werden, um zweidimensionale Abtastmuster von LiDAR-Systemen zu untersuchen. Anstelle einen einzelnen Sensor zu verbauen, würde dann eine Kombination von Scannern im Laserpfad platziert werden. Diese Art der Messung erlaubt die Vermessung des FoVs, der Abdeckung, als auch der Bildwiederholrate. Zusätzlich kann die 2D-Messung Einbautoleranzen der Scaneinheiten aufzeigen und deren Auswirkung offenlegen.

Herausforderungen in der Umsetzung werden z. B. in der Verwendung des RTST erwartet, da die Ablenkung je nach Strahlenpfad und Anordnung der Ablenkeinheiten nicht zwangsläufig aus einem einzigen Punkt erfolgt. Einzelmessungen der Einheiten und komplexere mathematische Modelle wären notwendig, um die Unsicherheiten in der Distanzbestimmung zu minimieren. Zusätzlich ist die Validierung eines solchen Systems aufgrund der zweiten Ausdehnung komplexer.

Intrinsische Kalibration

Eine zweite Variation des Systems kann gemäß dem Patent [150] erfolgen. Hier ist die

Scaneinheit auf zwei Goniometern angebracht, deren Rotationsursprung im Zentrum der Ablenkung ist. Durch diese Änderung kann das Messsystem intrinsisch für jede Scaneinheit äußerst genau direkt auf Ablenkwinkel kalibriert werden.

Nach dem Einsetzen einer Einheit kann diese mithilfe der automatisierten Goniometer auf verschiedene Ablenkwinkel, ähnlich zu der statischen Kalibration aus Kapitel 5.4, eingestellt werden, ohne dass sich der Prüfling bewegt. Nachdem das benötigte Muster abgefahren wurde, können die eingestellten und die gemessenen Winkel mithilfe eines Modells oder einer LUT ineinander umgerechnet werden. Es ist zu erwarten, dass diese Methodik genauer ist, da ein direkter Zusammenhang zwischen dem kalibrierten und dem gemessenen Ablenkwinkel besteht.

Der Einsatz eines solchen Systems ist aufgrund der zusätzlichen Aktuatoren deutlich komplexer und teurer. Zusätzlich verlängert sich die Messzeit, da jeder Prüfling für viele Ablenkwinkel vermessen werden muss.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die Untersuchungen und Ergebnisse dieser Dissertation zusammen und gibt einen Ausblick für die Vermessungen von Scaneinheiten in 3D-LiDAR Systemen für das assistierte und autonome Fahren.

Anforderungen an LiDAR-Systeme

Basierend auf dem Stand der Technik ist in dieser Arbeit die Anforderung an LiDAR-Systeme für den Einsatz auf Autobahnen hergeleitet worden. Als Grundlage dienten dabei gesetzte spezifische Regularien, wie Maximalgeschwindigkeiten und vorgeschriebene Radien auf Autobahnen. Die Richtlinie zum Straßenbau in Deutschland [99] ist an mehreren Stellen verwendet worden, um die Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit, Steigung und Radius modellieren zu können. Die Bestimmung von Detektionsraten und deren Grenzwerten in Anbetracht von Automobilflotten führte zu notwendigen Bildwiederholraten für eine Detektion mit ausreichender Wahrscheinlichkeit. Die Auflösung ist im gleichen Bezug an die Höhe kleinster Hindernisse gebunden. Die notwendige Reichweite ergab sich durch den Bremsweg, während das Sichtfeld (FoV) durch Kurvenradien bzw. die Straßensteigung und Einbautoleranzen begrenzt ist. Die nachfolgende Tabelle 7.1 zeigt die bestimmten Parameter im Überblick.

Tabelle 7.1: Resultierende Anforderungen für Langstrecken-LiDARe.

Parameter	Einheit	Wert
Framerate	Hz	15
Range	m	165
Horizontale Auflösung	°	0,016
Vertikale Auflösung	°	0,016
Vertikales FoV	°	12
Horizontales FoV	°	41

Zukünftige Arbeiten sollten aktuelle Anforderungen der Automobilindustrie - also Richtlinien Dritter, Regulationen und Erfahrungen - in die Evaluation miteinbeziehen. Dies ist insbesondere deshalb wichtig, weil sich diese aktuell noch entwickeln und es keinen Konsens gibt. Ferner sollten Grenzwerte für Detektionsraten auch in Anbetracht von „Partial Hits“ bestimmt werden, was die Anforderungen realistischer werden lässt. Simulationen in Programmen, wie CarMaker (IPG Automotive) mit zusätzlichen Modellen für LiDAR-Systeme, lassen Validierungen auf Software-Ebene zu, um bestimmte Leistungsparameter testen und optimieren zu können.

Messsystem zur Charakterisierung von Ablenkeinheiten

Basierend auf den hergeleiteten Anforderungen für LiDAR-Systeme sind Anforderungen an ein Messsystem zur Charakterisierung von MEMS-Scannern bestimmt worden. Ein funktionsfähiges Konzept, bestehend aus einem lambertschen Schirm, einer abbildenden Optik und einer PSD auf einer Linearachse, wurde vorgestellt. Durch eine zweidimensionale, statische Kalibration mithilfe von zwei Linearachsen konnten Verzeichnungen korrigiert werden. Eine neuartige Methode zur intrinsischen Kalibration der tatsächlichen Spiegelposition namens „Ray Trace Shifting Technique“ wurde vorgestellt.

Eine statische Validierung mittels Rotationstisch zeigt die Linearität über den gesamten Messbereich und die minimal erreichbare Auflösung von bis zu $0,005^\circ$, welche durch die Kalibration-LUT vorgegeben ist. Eine dynamische, MEMS-basierte Validierung mit MEMS-Prüfling nutzte eine externe FoV-Messung zum Vergleich der absolut gemessenen Amplitude, welche für verschiedene Anregungsamplituden durchgeführt worden ist. Die Abweichungen befinden sich im Rahmen der Messunsicherheit mit einer maximalen absoluten FoV-Abweichung von ca. $0,5^\circ$.

Das aufgebaute System übersteigt die Sichtfelder, welche mit aktuell erhältlichen Messständen vermessen werden können. Die intrinsische Kalibration mittels RTST erleichtert den korrekten Einbau, reduziert Kosten und verringert die absolute Messzeit pro Prüfling. Zukünftige Systeme müssen noch größere Sichtfelder von bis zu 120° abdecken können, um auch Scaneinheiten für Nahbereich-LiDARs charakterisieren zu können. Verbesserungen der PSD und deren Elektronik ermöglichen außerdem Messungen mit höherer Bandbreite, die auch für dynamische Vibrationstests eingesetzt werden könnten.

Symbolverzeichnis

d	Objektdistanz bei der Abstandsmessung
c	Lichtgeschwindigkeit
Δt	Zeitdifferenz, Laufzeit eines Laserpulses
$\Delta\phi$	Phasendifferenz bei AMCW-LiDAR
f_M	Modulationsfrequenz bei AMCW-LiDAR
f_r	Frquenzunterschied bei FMCW-LiDAR
f_r	Frquenzunterschied bei FMCW-LiDAR
B	Frquenzbandbreite des Chirps bei FMCW-LiDAR
T	Dauer des Chirps bei FMCW-LiDAR
P_s	Signalleistung von LiDAR-Systemen an lambertschen Targets
A_r	Apertur des Empfangspfads von LiDAR-Systemen
T_t	Transmission des Sendepfads von LiDAR-Systemen
T_r	Transmission des Empfangspfads von LiDAR-Systemen
ρ	Reflektivität eines lambertschen Targets
P_0	Ausgestrahlte Leistung eines LiDAR-Systems
σ	Atmosphärische Absorptionskoeffizient
R	Reichweite eines LiDAR-Systems
f_r	Allgemeine Funktion der BRDF
θ_i	Azimuthwinkel des einfallenden Lichts in der BRDF
ϕ_i	Elevationswinkel des einfallenden Lichts in der BRDF
θ_r	Azimuthwinkel des gestreuten Lichts in der BRDF
ϕ_r	Elevationswinkel des gestreuten Lichts in der BRDF
λ	Wellenlänge des Lichts
TPR	Richtig-positiv-Rate (True positive rate) der binären Klassifizierung
FNR	Falsch-negativ-Rate (False negative rate) der binären Klassifizierung
RNR	Richtig-negativ-Rate (True negative rate) der binären Klassifizierung
FPR	Falsch-positiv-Rate (False positive rate) der binären Klassifizierung
$P(X)$	Wahrscheinlichkeitsfunktion der Binomialverteilung

k	Teilmenge von Ereignissen in der Binomialverteilung
n	Gesamtmenge an Ereignissen in der Binomialverteilung
p	Einzelwahrscheinlichkeit in der Binomialverteilung
$F(x)$	Kumulierte Binomialverteilung mit mindestens x Ereignissen
FoV_h	Horizontales Sichtfeld eines LiDARs
FoV_v	Vertikales Sichtfeld eines LiDARs
$f_{T,max}$	Maximaler tangentialer Kraftschluss aus der Straßenführung
$f_{r,max}$	Maximaler radialer Kraftschluss aus der Straßenführung
v_0	Anfangsgeschwindigkeit
S_h	Haltesichtweite aus der Straßenführung
S_1	Anteil der Haltesichtweite aus der Reaktion der Straßenführung
t_R	Reaktionszeit in der Haltesichtweite, $t_R = 2s$ [99]
t_{Latenz}	Latenzzeit für die Haltesichtweite
$t_{Detektion}$	Detektionszeit für die Haltesichtweite
$t_{Bremsen}$	Ansprungszeit der Bremsen für die Haltesichtweite
S_2	Anteil der Haltesichtweite aus der Bremsung der Straßenführung
g	Fallbeschleunigung, $g = 9.81$ [99]
s	Straßenlängsneigung aus der Straßenführung
a	Bremsbeschleunigung der Haltesichtweite der Straßenführung
R_{min}	Minimaler Kurvenradius der Straßenführung
n	Ausnutzungsgrad für den Kurvenradius der Straßenführung
q	Straßenquerneigung aus der Straßenführung
px	Absolute Abmessung eines Pixels für die LiDAR-Auflösung
μ	Erwartungswert
N	Anzahl von Fahrzeugen für die Wahrscheinlichkeitsbestimmung
$P_{FNR, Grenzwert}$	Wahrscheinlichkeitsgrenzwert der Falsch-negativ-Rate
$P_{TPR, Grenzwert}$	Wahrscheinlichkeitsgrenzwert der Richtig-positiv-Rate
$P_{FPR, Grenzwert}$	Wahrscheinlichkeitsgrenzwert der Falsch-positiv-Rate
M	Multiplikator für die Wahrscheinlichkeit
P_{Frame}	Wahrscheinlichkeit pro Frame, z. B. TPR
p_{Pixel}	Wahrscheinlichkeit pro Pixel, z. B. TPR
n	Gesamtzahl der Pixel in der Detektionsratenbestimmung
k	Teilmenge der Pixel in der Detektionsratenbestimmung
M	Anzahl der Zeilen in der Detektionsratenbestimmung
N	Gesamtzahl der Frames in der Detektionsratenbestimmung
K	Teilmenge der Frames in der Detektionsratenbestimmung
fps	Bildrate, Framerate
N	Anzahl der Frames innerhalb der Detektionszeit

$\Delta\gamma$	Auflösung des LiDARs
h	Einbauhöhe des LiDARs im Auto
$\Theta_{\text{Straße}}$	Winkel der Straße entlang der Längsneigung
θ_{unten}	Unterer Anteil des vertikalen Sichtfelds
θ_{oben}	Oberer Anteil des vertikalen Sichtfelds
t	Höhe des Hindernisses für das vertikale Sichtfeld
R	Kurvenradius für das horizontale Sichtfeld
Φ_{Kurve}	Anteil des horizontalen Sichtfelds aus der Kurve
l	Abstand eines Hindernisses von der Kurvenfahrbahn
α	Winkel zur Berechnung des horizontalen Sichtfelds
δ	Winkel zur Berechnung des horizontalen Sichtfelds
$\Delta\Phi_{\text{Kalib}}$	Kalibriertoleranz des LiDARs
$\Delta\Phi_{\text{Einbau}}$	Einbautoleranz des LiDARs
f_{MEMS}	Scanfrequenz eines MEMS-Scanners
f_{MEMS}	Scanfrequenz eines MEMS-Scanners
$n_{\text{Kanäle}}$	Anzahl an Sende- bzw. Empfangskanälen eines LiDARs
η	Verhältnis der eindimensionalen Winkelausdehnung entlang der Abtastrichtung aus Sende- und Empfangspfad
t	Zeit
Φ_{p}	Projizierter Azimuth-Abtastwinkel
t_i	Zeitpunkte, z. B. t_0 als Referenzstartpunkt
$\Phi_{\text{p},0}$	Projizierter Azimuth-Abtastwinkel als Referenz
I	Stromstärke einer PSD, Indizes beschreiben die Achse
L	Kantenlänge der PSD, Indizes beschreiben die Achse
u	Horizontale Position auf der PSD
v	Vertikale Position auf der PSD
U	Spannung an einer PSD vom Typ pin-cushin, Indizes beschreiben die Achse
U_{Summe}	Summenspannung an einer PSD vom Typ pin-cushin
ΔR	Positionsauflösung einer PSD
e_n	Ausgangs-Rauschspannung einer PSD
θ	Ablenkwinkel der MEMS-Scaneinheit
X,Y,Z	Schirmkoordinatensystem, X, Y bezeichnen den horizontalen und vertikalen Auftreffpunkt auf dem Schirm
d	Abstand zwischen dem Rotationszentrum und dem Schirm
d_0	Maximaler Abstand zwischen dem Rotationszentrum und dem Schirm
θ_0	Nullpunktswinkel: Einbau-Winkelfehler der MEMS-Ablenkeinheit

X_D	Querabstand: Horizontale Einbautoleranz der MEMS-Ablenkeinheit
z	Position des beweglichen Tisches
a, b	Lineare Regressionsparameter, Indizes beschreiben verschiedene Winkel
s	Skalierungsfaktor im Kamera-Pinhole-Modell
\mathbf{H}	Homografiematrix
\mathbf{H}_{int}	Intrinsische Homografiematrix
\mathbf{H}_{ext}	Extrinsische Homografiematrix
δ	Rotationswinkel der PSD
α, β	Vergrößerungsfaktoren
γ	„Skew“
u_0, v_0	„Principal Point“
t_x, t_y	Extrinsische Verschiebung
r	Abstand zwischen den korrigierten PSD-Positionen (ohne Verzeichnung) und dem „Principal-Point“
u_d, v_d	Verzeichnete PSD-Position
u_u, v_u	Korrigierte PSD-Position
k_1, k_2	Optimierungsparameter zur radialen Verzeichnung
p_1, p_2	Optimierungsparameter zur tangentialen Verzeichnung
\mathbf{M}	Vektor der Schirmpositionen
\mathbf{M}	Vektor der gemessenen PSD-Positionen
\mathbf{l}	Vektor der Optimierungsparameter
\mathbf{f}, \mathbf{g}	Modellfunktionen
σ	Standardabweichung
x_i	Allgemeine Eingangsgröße der Messunsicherheit
y	Allgemeine Ausgangsgröße der Messunsicherheit
N	Anzahl an Messgrößen
\bar{x}	Mittelwert der Eingangsgrößen
p, q	Hilfsgrößen zur Bestimmung der Standardabweichung des gemessenen Ablenkwinkels
$\Delta\theta_{\text{vektor}}$	Absoluter, vektoriell bestimmter Ablenkwinkel
$\Delta\theta_{\text{trig}}$	Absoluter, trigonometrisch bestimmter Ablenkwinkel
$X_{\text{ref, max}}$	Maximal gemessene Position der Referenz
$X_{\text{ref, min}}$	Minimal gemessene Position der Referenz
d_{ref}	Abstand der MEMS-Ablenkeinheit in der Referenzmessung
\mathbb{N}_0	Menge der natürlichen Zahlen mit 0
π	Kreiszahl, $\pi = 3.14159\dots$

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive cruise control, Abstandsregeltempomat
ACEA	Articulated pedestrian target specifications
ADAS	Advanced driver assistance system, Fahrerassistenzsystem
AEB	Autonomous emergency braking
ALKS	Automated lane keeping system, Automatisches Spurhaltesystem
AMCW	Amplitude modulated continuous wave
APD	Avalanch-Photodiode
AR	Augmented Reality
BAST	Bundesamt für Straßenbau
BRDF	Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion
CAS	Collision avoidance system, Notbremsassistent
CCD	Charge-coupled device
CCRB	TestszENARIO der Euro NCAP: Auffahrunfall zweier Fahrzeuge bei Bremsung
CCRM	TestszENARIO der Euro NCAP: Bewegter Auffahrunfall zweier Fahrzeuge
CCRS	TestszENARIO der Euro NCAP: Stationärer Auffahrunfall zweier Fahrzeuge
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CMS	Camera monitoring system, Kameraüberwachungssystem
CUT-IN	TestszENARIO der Euro NCAP: Auffahrunfall auf ein einschneidendes Fahrzeug
CUT-OUT	TestszENARIO der Euro NCAP: Auffahrunfall mit Spurwechsel
CW-Laser	Dauerstrich Laser
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
EKA	Entwurfsklasse der RAA
EPTa, EPTc	Euro NCAP Pedestrian Target, a: Erwachsener, c: Kind

Euro NCAP	European New Car Assessment Programme, Europäisches Neuwagen-Bewertungs-Programm
FFT	Fast fourier transform, schnelle Fourier-Transformation
FMCW	Frequency modulated continuous wave
FN	Falsch negativ, falsch negativ
FNR	Falsch negativ rate, Falsch-negativ-Rate
FoV	Field of view, Sichtfeld
FP	False positive, falsch positiv
FPR	False positive rate, Falsch-positiv-Rate
GVT	Global vehicle target
LCM	Light control metasurface
LDWS	Lane departue warning system, Spurhaltewarnsystem
LED	Light emitting diode, lichtemittierende Diode
LiDAR	Light detection and ranging
LKS	Lane keeping system, Spurhaltesystem
LUT	Lookup table
MEMS	Micro-electro-mechanical system
OEM	Erstausrüster
OPA	Optical phased array
PSD	Positionsempfindliche Diode
RAA	Richtlinie für die Anlage von Autobahnen
Radar	Radio detection and ranging
RMS	Quadratisches Mittel
RoI	Region of interest, Interessensbereich
RTST	Ray Trace Shifting Technique
RX	Empfangspfad
SAE	Society of Automotive Engineers
SiPM	Silizium Photomultiplier
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis
SPAD	Einzelphoton-Avalanche-Diode
TEM	Transeuropäische Autobahnen
TEN	Transeuropäische Netze
TIA	Transimpedanzverstärker
TN	True negative, richtig negativ
TNR	True negative rate, Richtig-negativ-Rate
ToF	Time of flight, Flugzeitbestimmung
TP	True positive, richtig positiv
TPR	True positive rate, Richtig-positiv Rate

TTC	Time to collision, Zeit bis zur Kollision
TX	Sendepfad
UNECE	Wirtschaftskommission für Europa
VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser, Oberflächenemitter
VDA	Verband der deutschen Automobilindustrie
VRU	Vulnerable road user, gefährdeter Fahrbahnnutzer
VUT	Vehicle under test, Testfahrzeug

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verbaute Sensoren und deren Verwendung für ADAS ([13], basierend auf ©2022 [73] IEEE).	8
3.1	Schematische Darstellung des „Time-of-Flight“-Prinzips: (a) Signalverlauf und (b) Anordnung (basierend auf [108], S. 3).	18
3.2	Schematische Darstellung des AMCW-Prinzips für die Distanzbestimmung: (a) Signalverlauf und (b) Anordnung (basierend auf [108], S. 4).	19
3.3	Schematische Darstellung des FMCW-Prinzips für die Distanzbestimmung: (a) Signalverlauf basierend auf [108], S. 4) und (b) Anordnung (basierend auf [16], S. 1).	20
3.4	Vier verschiedene Konzepte des mechanischen Scannens in LiDAR-Sensoren: (a) Keilprismen, (b) Polygonscanner, (c) Galvanometer, (d) Spiegel (basiert auf: Abbildung 1.4 von [89] S. 11).	21
3.5	Blickfeld MEMS-Strahlableitungseinheit [92].	23
3.6	Schematische Darstellung eines Flash-LiDARs (basierend auf [142]).	23
3.7	Mögliche Ergebnisse nach binärer Klassifizierung: Detektion (grün) und keine Detektion (rot).	27
3.8	Bezeichnungen im Sichtbereich.	30
4.1	Haltesichtweiten nach RAA- und UNECE-Spezifikationen.	39
4.2	Minimale Autobahnradien nach RAA und UNECE.	41
4.3	Darstellung relevanter Testszenarien: (a) Direkte Auffahrunfälle, (b) CUT-IN, (c) CUT-OUT (basierend auf [36] S. 22 ff.).	43
4.4	Kleinst mögliches Hindernis (schwarz), die nicht detektierten Pixel (weiß) und die Detektionen (grün): (a) schlechteste Ausrichtung und (b) beste Ausrichtung.	48
4.5	Mögliche Kombinationen aus detektierten Pixeln (grün) und nicht detektierten Pixeln (rot) bei einer Metrik von mindestens drei aus fünf pro Zeile.	51

4.6	1-TPR (a) und FPR (b) für alle K_{\min} und N die innerhalb der jeweiligen Grenzwerte liegen. Die Farbskalen zeigen die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten.	54
4.7	1-TPR (a) und FPR (b) für alle K_{\min} und N die innerhalb beider Grenzwerte liegen. Die Farbskalen zeigen die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten.	55
4.8	Verschiedene Reaktionszeiten gegenüber der Framerate.	56
4.9	Haltesichtweite gegenüber der Framerate für verschiedene Geschwindigkeiten.	57
4.10	Bezeichnung des vertikalen FoVs.	59
4.11	Mathematischer Zusammenhang für das vertikale FoV für eine abfällige Straße.	60
4.12	Geometrischer Zusammenhang für das vertikale FoV für eine ansteigende Straße.	61
4.13	Mathematischer Zusammenhang für das Kurvenszenario zur Bestimmung des horizontalen FoVs aus der Vogelperspektive.	63
4.14	Anforderung an das horizontale FoV gegenüber der Anfangsgeschwindigkeit für das Modell und die Regularien aus [99, 118].	65
4.15	Schema des Sichtfelds des Detektors für $\eta = 7$ entlang des projizierten Azimuth-Winkels Φ_p der Scannerabtastung für drei verschiedene Zeitpunkte nach der Emission des Laserpulses: (a) $t = t_0$, (b) $t = t_1$ und (c) $t = t_2$. . .	70
5.1	Schematischer Aufbau der verschiedenen Sensortypen basierend auf [121]: (a) Quadrantenphotodiode und (b) laterale PSD.	77
5.2	Schematischer Aufbau eines Konoskops ([33] übersetzt und Anzahl der Strahlen reduziert).	79
5.3	Schematischer Aufbau von zweidimensionalen PSDs:(a) duo-lateral, (b) tetra-lateral in der Konfiguration „pin-cushin“.	80
5.4	Schematischer Aufbau des Messsystems mit dem Laserpfad (a) und dem Detektorpfad (b) (basierend auf [149]).	84
5.5	Foto des Prüfstands mit dem Laserpfad (a) und dem Detektorpfad (b) (basierend auf [149]).	85
5.6	Konzept zur Berechnung des Ablenkwinkels mittels RTST (basierend auf [149]).	86
5.7	Schematischer Aufbau der Kalibration.	88
5.8	Ablaufdiagramm der drei Optimierungsschritte: (a) vorwärts ohne Verzeichnung, (b) rückwärts mit radialer Verzeichnung und (c) rückwärts mit radialer und tangentialer Verzeichnung.	93
5.9	Umgerechnete Laserposition auf dem Schirm für die Messdaten aus der Kalibration (rot) mit den eingestellten Sollpositionen (schwarz) (basierend auf [149]).	95

5.10	Gemessene Abweichung der Kalibrierung von den eingestellten Laserpositionen auf dem Schirm (basierend auf [149]).	95
5.11	Gemessene Abweichung der Kalibrierung von den eingestellten Laserpositionen auf dem Schirm in Form eines Histogramms: horizontal (a) und (b).	96
5.12	Aufbau zur statischen Validierung: (a) Laserpfad, (b) Detektorpfad.	97
5.13	Gemessene Laserposition auf dem Schirm mit linearer Regression für verschiedene Schlittenabstände und eingestellte Ablenkwinkel (basierend auf [149]).	100
5.14	Linearität der Messmethoden: Relative, gemessene Ablenkwinkel für zwei Berechnungsmethoden gegenüber den eingestellten Winkeln (basierend auf [149]).	102
5.15	Linearität der Messmethoden: Relative, gemessene Ablenkwinkel für zwei Berechnungsmethoden gegenüber den Residuen der linearen Regressionen.	103
5.16	Statistische Abweichung der vektoriellen (blau) und trigonometrischen (gelb) Bestimmung des Ablenkwinkels gegenüber der Referenz (rot).	104
5.17	Minimale Messauflösung des Ablenkwinkels gegenüber der Winkeleinstellung und Längsachsenposition.	106
5.18	Aufbau der Referenzmessung zur FoV-Bestimmung mit den relevanten Größen.	108
5.19	Ergebnisse der dynamischen Messung mit einer Anregungsamplitude von 400 bei einer Schirmdistanz von 18 mm: (a) PSD-Spannungen, (b) PSD-Positionen, (c) Schirmpositionen.	109
5.20	Histogramme des Längsabstands durch die RTST mit Normalverteilung für Anregungsamplituden von: (a) 300, (b) 400 und (c) 500. Die rote vertikale Markierung zeigt den Mittelwert, die gestrichelten Linien markieren die Standardabweichung.	111
5.21	Ablenkwinkel gegenüber der Zeit bei einer Anregungsamplitude von 400 für: (a) den gemittelten Ablenkwinkel über alle Distanzen, (b) den ersten Nulldurchgang für alle Distanzen und (c) das erste Maxima für alle Distanzen. Die berechneten Standardabweichungen sind in (b) und (c) als farblicher Korridor hinterlegt.	113
5.22	Ablenkwinkel aus der vektoriellen und der trigonometrischen Berechnung für alle Anregungsamplituden (basierend auf [149]).	114
5.23	Mittelwert und Messabweichung für eine Periode über alle Daten für eine Anregungsamplitude von 400 bei der Tischposition von 18 mm.	115
5.24	Unterschied der Ablenkwinkel zwischen dem Messsystem und der Referenzmessung für drei verschiedene Anregungsamplituden (basierend auf [149]).	117

Literaturverzeichnis

- [1] AB Dynamics. *Guided Soft Target*. Hrsg. von AB Dynamics. England, 2021. URL: <https://www.abdynamics.com/resources/files/SP-6013-Guided-Soft-Target-GST-Specification.pdf> (besucht am 01.04.2023).
- [2] AB Dynamics. *Soft Pedestrian Target: Controllable pedestrian target which can be vehicle-synchronised for ADAS testing*. Hrsg. von AB Dynamics. England, 2019. URL: <https://www.abdynamics.com/resources/files/SP6030-i9-Soft-Pedestrian-Target.pdf> (besucht am 01.04.2023).
- [3] ACEA. *Articulated Pedestrian Target Specifications: Articulated Pedestrian Target Specifications*. Hrsg. von ACEA. 2016. URL: https://www.acea.auto/files/Articulated_Pedestrian_Target_Specifications_-_Version_1.0.pdf (besucht am 01.04.2023).
- [4] Apple. *Apple unveils new iPad Pro with LiDAR Scanner and trackpad support in iPadOS*. 2022-10-17T16:52:40.000Z. URL: <https://www.apple.com/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/> (besucht am 17.10.2022).
- [5] Yu. P. Artemov, L. A. Bakumov, V. P. Blagikh, E. A. Khesed und Ya. L. Khlyavich. „Two-dimensional position-sensitive photodetector for high-precision alignment“. In: *Measurement Techniques* 19.8 (1976), S. 1111–1113. ISSN: 0543-1972. DOI: 10.1007/BF00825648.
- [6] Gerardo Atanacio-Jiménez, José-Joel González-Barbosa, Juan B. Hurtado-Ramos, Francisco J. Ornelas-Rodríguez, Hugo Jiménez-Hernández, Teresa García-Ramirez und Ricardo González-Barbosa. „LIDAR Velodyne HDL-64E Calibration Using Pattern Planes“. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* 8.8/5 // 5 (2011), S. 70–82. DOI: 10.5772/50900.
- [7] Automoustuff. *Valeo SCALA 3D Laser Scanner (Gen 2)*. Hrsg. von Automoustuff. URL: <https://autonomoustuff.com/products/valeo-scala-gen-2> (besucht am 04.10.2022).

- [8] AutonomouStuff. *Luminar Iris*. Hrsg. von AutonomouStuff. Morton, IL 61550, 2023-04-01T14:04:02.000Z. URL: <https://autonomoustuff.com/products/luminar-iris> (besucht am 01.04.2023).
- [9] Hans-Jochen Bartsch. *Taschenbuch mathematischer Formeln für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 22., neu bearbeitete Auflage. München: Hanser Verlag, 2011. ISBN: 978-3446427853. DOI: 10.3139/9783446429277. URL: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446429277>.
- [10] Daniel Bastos, Paulo P. Monteiro, Arnaldo S. R. Oliveira und Miguel V. Drummond. „An Overview of LiDAR Requirements and Techniques for Autonomous Driving“. In: *2021 Telecoms Conference (ConfTELE)*. IEEE, 11.02.2021 - 12.02.2021, S. 1–6. ISBN: 978-1-6654-1588-0. DOI: 10.1109/ConfTELE50222.2021.9435580.
- [11] Jorge Beltrán, Carlos Guindel, Arturo de La Escalera und Fernando García. „Automatic Extrinsic Calibration Method for LiDAR and Camera Sensor Setups“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (). DOI: 10.1109/TITS.2022.3155228. URL: <https://arxiv.org/pdf/2101.04431>.
- [12] Klaus Bengler, Klaus Dietmayer, Berthold Farber, Markus Maurer, Christoph Stiller und Hermann Winner. „Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives“. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 6.4 (2014), S. 6–22. ISSN: 1939-1390. DOI: 10.1109/MITS.2014.2336271. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6936444> (besucht am 23.06.2023).
- [13] Blickfeld. *ADAS-Sensoren-Deutsch.pdf*. Barthstraße 12, 80339 München, 2023.
- [14] Bosch. „Ultrasonic sensor: Surround sensor for the calculation of distances to obstacles and to monitor space when parking and maneuvering“. In: (). URL: https://www.bosch-mobility-solutions.com/media/global/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/construction-zone-assist/ultrasonic-sensor/onepager_ultrasonic_sensor_en_25012021.pdf (besucht am 23.10.2022).
- [15] Ryan G. Brazeal, Benjamin E. Wilkinson und Hartwig H. Hochmair. „A Rigorous Observation Model for the Risley Prism-Based Livox Mid-40 Lidar Sensor“. In: *Sensors* 21.14 (2021), S. 4722. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21144722. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/14/4722>.
- [16] Bridger Photonics Inc. *FMCW LiDAR*. Hrsg. von Bridger Photonics Inc. 2019. URL: https://www.bridgerphotonics.com/sites/default/files/inline-files/FMCW_LiDAR.pdf (besucht am 11.08.2023).

- [17] D. C. Brown. „Decentering Distortion of Lenses: The prism effect encountered in metric cameras can be overcome through analytic calibration.“ In: *Photogrammetric Engineering* Vol. XXXII, No. 3. (1966), S. 444–462.
- [18] Bundesanstalt für Straßenwesen. *Selbstfahrende Autos – assistiert, automatisiert oder autonom?* Hrsg. von Bundesanstalt für Straßenwesen. Deutschland, 2021. URL: <https://www.bast.de/DE/Presse/Mitteilungen/2021/06-2021.html> (besucht am 29.10.2022).
- [19] Aleksandr Bystrov, Edward Hoare, Thuy-Yung Tran, Nigel Clarke, Marina Gashinova und Mikhail Cherniakov. „Road Surface Classification Using Automotive Ultrasonic Sensor“. In: *Procedia Engineering* 168.12 (2016), S. 19–22. ISSN: 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.119.
- [20] C. -P. Hsu, B. Li, B. Solano-Rivas, A. R. Gohil, P. H. Chan, A. D. Moore und V. Donzella. „A Review and Perspective on Optical Phased Array for Automotive LiDAR“. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 27.1 (2021), S. 1–16. ISSN: 1558-4542. DOI: 10.1109/JSTQE.2020.3022948.
- [21] Binh Xuan Cao, Phuong Le Hoang, Sanghoon Ahn, Heeshin Kang, Jengo Kim und Jiwhan Noh. „High-Speed Focus Inspection System Using a Position-Sensitive Detector“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 17.12 (2017). DOI: 10.3390/s17122842.
- [22] Xiaopeng Chen, Chengrong Li, Yunkuan Wang und Kui Yuan. „An Algorithm for Correction of Distortion of Laser Marking Systems“. In: *2007 IEEE International Conference on Control and Automation*. IEEE, 30.05.2007 - 01.06.2007, S. 487–491. ISBN: 978-1-4244-0817-7. DOI: 10.1109/ICCA.2007.4376404.
- [23] Hyun Choi und Wan-Chin Kim. „Optical system design for light detection and ranging sensor with an ultra-wide field-of-view using a micro actuator“. In: *Microsystem Technologies* 26.11 (2020), S. 3561–3567. ISSN: 0946-7076. DOI: 10.1007/s00542-020-04997-1.
- [24] Stefanie Cincotta, Adrian Neild, Cuiwei He und Jean Armstrong. „Visible Light Positioning Using an Aperture and a Quadrant Photodiode“. In: *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, 4.12.2017 - 08.12.2017, S. 1–6. ISBN: 978-1-5386-3920-7. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2017.8269150.
- [25] Véronique Collomb-Patton, Pierre Boher und Thierry Leroux. „17.4: Comprehensive Survey on Viewing Angle Measurement Devices: A Theoretical Study“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 40.1 (2009), S. 220. ISSN: 0034-6748. DOI: 10.1889/1.3256746.

- [26] Continental Automotive. *High Resolution 3D Flash LiDAR™*. Hrsg. von Continental Automotive. 2023-01-25T15:07:04.000Z. URL: <https://www.continental-automotive.com/en-gl/Passenger-Cars/Autonomous-Mobility/Enablers/Lidars/3D-Flash-Lidar> (besucht am 25.01.2023).
- [27] Shashank Dabral, Sanmati Kamath, Vikram Appia, Mihir Mody, Buyue Zhang und Umit Batur. „Trends in camera based Automotive Driver Assistance Systems (ADAS)“. In: *2014 IEEE 57th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 3.08.2014 - 06.08.2014, S. 1110–1115. ISBN: 978-1-4799-4132-2. DOI: 10.1109/MWSCAS.2014.6908613.
- [28] Zhuoqun Dai, Alexander Wolf, Peer-Phillip Ley, Tobias Glück, Max Caspar Sundermeier und Roland Lachmayer. „Requirements for Automotive LiDAR Systems“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 22.19 (2022). DOI: 10.3390/s22197532.
- [29] T. Doke, J. Kikuchi, H. Yamaguchi, S. Yamaguchi, K. Yamamura, Tadayoshi Doke, Jun Kikuchi et al. „A NEW TWO-DIMENSIONAL POSITION SENSITIVE DETECTOR WITH A GOOD LINEAR RESPONSE // A new two-dimensional position sensitive detector with a good linear response“. In: *uclear Instruments and Methods in Physics Research* 1987 // 261.A261 // 3 (1987), S. 605–609. DOI: 10.1016/0168-9002(87)90377-9.
- [30] Axel Donges und Reinhard Noll. *Laser Measurement Technology: Fundamentals and Applications*. 1st ed. 2015. Bd. 188. Springer Series in Optical Sciences. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg und Imprint: Springer, 2015. ISBN: 9783662436349.
- [31] Douglas A. Kerr. *Derivation of the "Cosine Fourth" Law for Falloff of Illuminance Across a Camera Image*. 2007. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Derivation-of-the-%22Cosine-Fourth%22-Law-for-Falloff-a-Kerr/e35926694bdf2ea00b3d324eed8e1d4b2a151cc7> (besucht am 09.04.2023).
- [32] EETimes. „Lidar Startup Uses Metamaterials to Steer Beams“. In: *EE Times* (2019-03-20). URL: <https://www.eetimes.com/lidar-startup-uses-metamaterials-to-steer-beams/> (besucht am 20.03.2023).
- [33] Eckhardt Optics LLC. *Conoscopic Lenses: Facts and Specifications*. Hrsg. von Eckhardt Optics LLC. 2023-04-08T13:07:43.000Z. URL: <https://www.eckop.com/resources/optics/optics-advanced-lenses/how-conoscope-lenses-work/> (besucht am 08.04.2023).
- [34] Jason M. Eichenholz, Scott R. Campbell, John E. Mcwhirter, Matthew D. Weed und Lane A. Martin. „LIDAR SYSTEM WITH POLYGON MIRROR“. Pat. US2020284906 (A1). 2020.

- [35] Hans Joachim Eichler und Jürgen Eichler. *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 8., überarb. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 9783642414381. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1581036>.
- [36] Euro NCAP. *Assisted Driving - Highway Assist Systems: Test & Assessment Protocol: Implementation 2023*. 2023. URL: <https://cdn.euroncap.com/media/75441/euro-ncap-ad-test-and-assessment-protocol-v11.pdf> (besucht am 01.04.2023).
- [37] Euro NCAP. *Technical Bulletin: Global Vehicle Target Specifications*. Hrsg. von Euro NCAP. 2018. URL: <https://cdn.euroncap.com/media/39159/tb-025-global-vehicle-target-specification-for-euro-ncap-v10.pdf> (besucht am 24.03.2023).
- [38] Euro NCAP. *Test Protocol - AEB/LSS VRU systems: Implementation 2023*. Hrsg. von Euro NCAP. 2022. URL: <https://cdn.euroncap.com/media/75436/euro-ncap-aeb-lss-vru-test-protocol-v43.pdf> (besucht am 01.04.2023).
- [39] Europäische Union. *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen [2021/1718]*. 2021-09-30. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A42021X1718> (besucht am 07.04.2023).
- [40] European Union. *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the Advanced Emergency Braking Systems (AEBS): UN ECE 141*. 2014-02-27. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R131r1e.pdf> (besucht am 30.10.2022).
- [41] European Union. *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Automated Lane Keeping Systems: UN ECE 157*. 2021-03-04. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-03/R157e.pdf> (besucht am 30.10.2022).
- [42] Ludwig Fahrmeir, Christian Heumann, Rita Künstler, Iris Pigeot und Gerhard Tutz. *Statistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN: 978-3-662-50371-3. DOI: 10.1007/978-3-662-50372-0.
- [43] A. W. Fitzgibbon. „Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion“. In: *CVPR 2001*. Los Alamitos, Calif: IEEE Computer Society, 2001, S. I-125-I-132. ISBN: 0-7695-1272-0. DOI: 10.1109/CVPR.2001.990465.

- [44] T. Fujita, Y. Nagatani und K. Maenaka. „MEMS Mirror Controlling System with Holed-PSD“. In: *2010 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*. IEEE, 19.11.2010 - 21.11.2010, S. 446–449. ISBN: 978-1-4244-8481-2. DOI: 10.1109/ICETET.2010.101.
- [45] Zhe Gao, Jun Huang, Xiaofei Yang und Ping An. „Calibration of rotating 2D LIDAR based on simple plane measurement“. In: *Sensor Review* 39.2 (2019), S. 190–198. ISSN: 0260-2288. DOI: 10.1108/SR-11-2017-0237. URL: www.emeraldinsight.com/0260-2288.htm.
- [46] Salvatore Gnecci, Colin Barry, Stephen Bellis, Steve Buckley und Carl Jackson. „Long Distance Ranging Performance of Gen3 LiDAR Imaging System based on 1x16 SiPM Array“. In: *Proceedings of the International Image Sensors Society (IISS) Workshop, Snowbird, UT, USA, 23–27 June*, S. 11. URL: <https://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/2019%20Workshop/2019%20Papers/P11.pdf> (besucht am 18.07.2023).
- [47] Christopher Goodin, Daniel Carruth, Matthew Doude und Christopher Hudson. „Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS“. In: *Electronics* 8.1 (2019), S. 89. DOI: 10.3390/electronics8010089.
- [48] *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 1. ed., corr. and reprinted. Genève: International Organization for Standardization, 1995. ISBN: 92-67-10188-9.
- [49] Hamamatsu Photonics K.K., Hrsg. *PSD (Position Sensitive Detector)*. 2002. URL: <https://pdf.dzsc.com/S12/S1200.pdf> (besucht am 23.07.2022).
- [50] Miles Hansard, Seungkyu Lee, Ouk Choi und Radu Horaud. *Time-of-Flight Cameras*. London: Springer London, 2013. ISBN: 978-1-4471-4657-5. DOI: 10.1007/978-1-4471-4658-2.
- [51] Ying He, Bin Liang, Yu Zou, Jin He und Jun Yang. „Depth Errors Analysis and Correction for Time-of-Flight (ToF) Cameras“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 17.1 (2017). DOI: 10.3390/s17010092.
- [52] Kersten Heineke, Ruth Heuss, Ani Kelkar und Martin Kellner. „What’s next for autonomous vehicles?“ In: *McKinsey & Company* (2021-12-22). URL: <https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/our-insights/whats-next-for-autonomous-vehicles> (besucht am 01.11.2022).
- [53] Steffen Herbold. *Data-Science-Crashkurs: Eine interaktive und praktische Einführung*. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2022. ISBN: 3864908620. URL: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=3136411>.

- [54] Hesai. *FT120 Solid-State Blind Spot Lidar | HESAI Technology*. Hrsg. von Ltd. Hesai Technology Co. 2023-05-22T06:02:46+00:00. URL: <https://www.hesaitech.com/product/ft120/#specs> (besucht am 27.06.2023).
- [55] Hesai. *Pandar128E3X: 128-Channel Mechanical Lidar User Manual*. Hrsg. von Ltd. Hesai Technology Co. URL: https://www.hesaitech.com/wp-content/uploads/2023/05/Pandar128E3X_User_Manual_128-en-230510.pdf (besucht am 27.06.2023).
- [56] Sven T. S. Holmstrom, Utku Baran und Hakan Urey. „MEMS Laser Scanners: A Review“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 23.2 (2014), S. 259–275. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2013.2295470.
- [57] C. Hughes, M. Glavin, E. Jones und P. Denny. „Wide-angle camera technology for automotive applications: a review“. In: *IET Intelligent Transport Systems* 3.1 (2009), S. 19. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1049/iet-its:20080017.
- [58] Ibeo Automotive Systems GmbH. *ibeo NEXT Datasheet: Solid-State Lidar*. Hrsg. von Ibeo Automotive Systems GmbH. Hamburg, Germany, 2022. URL: https://cdn.www.ibeo-as.com/463fefb0be03975bcd0a4942f3e2a16a8b49a3ce/ibeoNEXT_Datasheet_08_22.pdf (besucht am 25.01.2023).
- [59] Henry Alexander Ignatious, Hesham-El Sayed und Manzoor Khan. „An overview of sensors in Autonomous Vehicles“. In: *Procedia Computer Science* 198 (2022), S. 736–741. ISSN: 18770509. DOI: 10.1016/j.procs.2021.12.315.
- [60] Alfonso Incoronato, Mauro Locatelli und Franco Zappa. „Statistical Modelling of SPADs for Time-of-Flight LiDAR“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 21.13 (2021). DOI: 10.3390/s21134481.
- [61] Institut für Unfallanalysen. *Bremsdauer*. Hrsg. von Institut für Unfallanalysen. 2023-04-01T11:36:06.000Z. URL: <https://unfallanalyse.hamburg/index.php/ifu-lexikon/bremsen/bremsdauer/#:~:text=Die%20Zeitspanne%2C%20die%20zwischen%20der,der%20Festlegung%20der%20Reaktionszeit%20ber%C3%BCcksichtigt.> (besucht am 01.04.2023).
- [62] International Electrotechnical Commission. *Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements*. 2014-05-15. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/3587> (besucht am 03.10.2022).
- [63] Christel Kaczmarczyk, Harald Kuhr, Petra Strupp, Jürgen Schmidt und Arne Schmidt. „Ausarbeiten eines Straßenentwurfs“. In: *Bautechnik für Bauzeichner*. Vieweg+Teubner, 2010, S. 567–618. DOI: 10.1007/978-3-8348-9391-8_12. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-8348-9391-8_12.

- [64] C. J. Karlsson und F. A. Olsson. „Linearization of the frequency sweep of a frequency-modulated continuous-wave semiconductor laser radar and the resulting ranging performance“. In: *Applied optics* 38.15 (1999), S. 3376–3386. ISSN: 1559-128X. DOI: 10.1364/ao.38.003376.
- [65] Omer David Keilaf. *Designing a Level 3 LiDAR for Highway Driving*. Hrsg. von Innoviz Technologies Ltd - HQ. 2022. URL: <https://innoviz.tech/https-innoviz-tech-download-4090> (besucht am 17.07.2022).
- [66] Peter M. Knoll. „72.1: Automotive Night Vision System with Picture Presentation“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 37.1 (2006), S. 1991. ISSN: 0097966X. DOI: 10.1889/1.2433443.
- [67] Walter Koechner. „Optical Ranging System Employing a High Power Injection Laser Diode“. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-4.1 (1968), S. 81–91. ISSN: 0018-9251. DOI: 10.1109/TAES.1968.5408936.
- [68] Lingchen Kong, Enpu Li, Dexing Yang und Hui Xing. „The PSD General Response Function“. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 59.3 (2012), S. 835–840. ISSN: 0018-9383. DOI: 10.1109/TED.2011.2180022.
- [69] Vipin Kumar Kukkala, Jordan Tunnell, Sudeep Pasricha und Thomas Bradley. „Advanced Driver-Assistance Systems: A Path Toward Autonomous Vehicles“. In: *IEEE Consumer Electronics Magazine* 7.5 (2018), S. 18–25. ISSN: 2162-2248. DOI: 10.1109/MCE.2018.2828440.
- [70] Joseph G. Lachapelle, Philip W. Smith, Matthew D. Weed und Jason M. Eichenholz. „LIDAR SYSTEM WITH SPATIAL LIGHT MODULATOR“. Pat. US2020256960 (A1). 2020.
- [71] R. Lange, P. Seitz, A. Biber, R. Schwarte, Robert Lange, Peter Seitz, Alice Biber et al. „Timeof-flight range imaging with a custom solid-state image sensor“. In: *SPIE* 3823 (1999), S. 180–191. DOI: 10.1117/12.360988.
- [72] Thomas Lehndorff, Ulrich Abelein, Adnan Alsiofy, Alexander Hirler, Torsten Sulima, Stefan Simon, Helmut Lochner et al. „Extended lifetime qualification concepts for automotive semiconductor components“. In: (2020). DOI: 10.18726/2020_2. URL: <https://athene-forschung.unibw.de/doc/131255/131255.pdf> (besucht am 08.04.2023).
- [73] Xinran Li, Kuo-Yi Lin, Min Meng, Xiuxian Li, Li Li, Yiguang Hong und Jie Chen. „A Survey of ADAS Perceptions With Development in China“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23.9 (2022), S. 14188–14203. ISSN: 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2022.3149763.

- [74] You Li und Javier Ibanez-Guzman. „Lidar for Autonomous Driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems“. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 37.4 (2020), S. 50–61. ISSN: 1053-5888. DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615. URL: <http://arxiv.org/pdf/2004.08467v1>.
- [75] Xiaoye Liu. „Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues“. In: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 32.1 (2008), S. 31–49. ISSN: 0309-1333. DOI: 10.1177/0309133308089496. URL: https://research.usq.edu.au/download/ea6511977f0ccdb438c826069a19f03d5d5a11d1972d9a11a024ad7080ee9198/199563/Liu_Progress_in_Phys_Geog_v32n1.pdf.
- [76] Gerald F. Marshall und Glenn E. Stutz. *Handbook of optical and laser scanning*. 2nd ed. Optical science and engineering. Boca Raton FL: CRC Press, 2012. ISBN: 9781439808795.
- [77] Iwao Matsuya, Ryuta Katamura, Maya Sato, Miroku Iba, Hideaki Kondo, Kiyoshi Kanekawa, Motoichi Takahashi et al. „Measuring relative-story displacement and local inclination angle using multiple position-sensitive detectors“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 10.11 (2010), S. 9687–9697. DOI: 10.3390/s101109687.
- [78] Paul F. McManamon. *LiDAR Technologies and Systems*. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2019. ISBN: 9781510625402. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6380048>.
- [79] Mercedes-Benz Group AG. *Mercedes-Benz partners with Luminar*. Hrsg. von Mercedes-Benz Group AG. 20.01.2022. URL: <https://group.mercedes-benz.com/innovation/product-innovation/autonomous-driving/articlepartnership-luminar.html> (besucht am 19.08.2023).
- [80] Mohit Sharma. *LiDAR Now High on Automotive Industry Radar - Counterpoint Research*. Hrsg. von Counterpoint Research. 2022. URL: <https://www.counterpointresearch.com/lidar-now-high-automotive-industry-radar/> (besucht am 02.04.2023).
- [81] M. Müller. *Das Blickfeld Scan-Pattern: Augenförmig und konfigurierbar*. Hrsg. von Blickfeld. 2020. URL: <https://www.blickfeld.com/de/blog/scan-pattern/> (besucht am 24.01.2023).
- [82] M. Müller. *LiDAR specifications explained*. Hrsg. von Blickfeld GmbH. 2020. URL: <https://www.blickfeld.com/blog/understanding-lidar-specifications/> (besucht am 22.01.2023).

- [83] F. E. Nicodemus, J. C. Richmond, J. J. Hsia, I. W. Ginsberg und T. Limperis. „Geometrical considerations and nomenclature for reflectance“. In: 1977 (1977). DOI: 10.6028/NBS.MONO.160. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/MONO/nbsmonograph160.pdf> (besucht am 10.06.2023).
- [84] Jaswanth Nidamanuri, Chinmayi Nibhanupudi, Rolf Assfalg und Hrishikesh Venkataraman. „A Progressive Review: Emerging Technologies for ADAS Driven Solutions“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 7.2 (2022), S. 326–341. ISSN: 2379-8858. DOI: 10.1109/TIV.2021.3122898.
- [85] Kento Nishibori und Kenji Nishibori. „Measurement of mirror inclination angle and distance using LED light sources and PSD“. In: *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 7.11.2011 - 10.11.2011, S. 215–220. ISBN: 978-1-61284-972-0. DOI: 10.1109/IECON.2011.6119314.
- [86] D. Nitzan, A. E. Brain und R. O. Duda. „The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis“. In: *Proceedings of the IEEE* 65.2 (1977), S. 206–220. ISSN: 0018-9219. DOI: 10.1109/PROC.1977.10458.
- [87] Klaus Pasquinelli, Rudi Lussana, Simone Tisa, Federica Villa und Franco Zappa. „Single-Photon Detectors Modeling and Selection Criteria for High-Background LiDAR“. In: *IEEE Sensors Journal* 20.13 (2020), S. 7021–7032. ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2977775.
- [88] Romuald Pawluczyk. „Holographic diffusers“. In: *Photopolymers and Applications in Holography, Optical Data Storage, Optical Sensors, and Interconnects*. Hrsg. von Roger A. Lessard. SPIE Proceedings. SPIE, 1993, S. 156. DOI: 10.1117/12.166350.
- [89] Quentin Pentek. „Contribution à la génération de cartes 3D-couleur de milieux naturels à partir de données d’un système multicapteur pour drone“. Dissertation. Université Montpellier, 2021-05-03. URL: https://theses.hal.science/tel-03215906/file/PENTEK_2020_archivage.pdf (besucht am 22.02.2023).
- [90] Mike Peterson. *iPhone 12 Pro LiDAR sensor allows for 6x faster low-light autofocus, instant AR* | *AppleInsider*. Hrsg. von appleinsider.com. 2020. URL: <https://appleinsider.com/articles/20/10/13/iphone-12-pro-lidar-sensor-allows-for-6x-faster-low-light-autofocus-instant-ar> (besucht am 17.10.2022).
- [91] F. Petit. *MEMS-Spiegel machen LiDAR-Sensoren fit für den Massenmarkt*. Hrsg. von Blickfeld GmbH. 2020. URL: <https://www.blickfeld.com/de/blog/mems-spiegel-fur-skalierbaren-lidar/> (besucht am 10.03.2023).

- [92] F. Petit. *Mit den LiDAR-Mythen aufgeräumt – Teil 1: Die Welt der LiDAR-Technologie*. Hrsg. von Blickfeld GmbH. München, 2021. URL: <https://www.blickfeld.com/de/blog/mit-den-lidar-mythen-aufgeraeumt-teil-1/> (besucht am 21.02.2023).
- [93] Anna Petrovskaya und Sebastian Thrun. „Model based vehicle detection and tracking for autonomous urban driving“. In: *Autonomous Robots* 26.2-3 (2009), S. 123–139. ISSN: 0929-5593. DOI: 10.1007/s10514-009-9115-1.
- [94] Inc. Photron USA. *Product Datasheet SA-Z: FASTCAM series by Photron*. Hrsg. von Inc. Photron USA. USA, 21.07.2022. URL: <https://photron.com/wp-content/uploads/2021/08/SA-Z-2021.pdf> (besucht am 08.04.2023).
- [95] J. Piao und M. McDonald. „Advanced Driver Assistance Systems from Autonomous to Cooperative Approach“. In: *Transport Reviews* 28.5 (2008), S. 659–684. ISSN: 0144-1647. DOI: 10.1080/01441640801987825.
- [96] M. Pierce, J. Stuart, A. Pungor, P. Dryden und V. Hlady. „Adhesion Force Measurements Using an Atomic Force Microscope Upgraded with a Linear Position Sensitive Detector“. In: *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 10.9 (1994), S. 3217–3221. DOI: 10.1021/1a00021a053.
- [97] Ben Popper. *Guiding Light: The billion dollar widget steering the driverless car industry*. 2017. URL: <https://www.theverge.com/2017/10/18/16491052/velodyne-lidar-mapping-self-driving-car-david-hall-interview> (besucht am 16.10.2022).
- [98] Egidio Ragonese, Giuseppe Papotto, Claudio Nocera, Andrea Cavarra und Giuseppe Palmisano. „CMOS Automotive Radar Sensors: mm-Wave Circuit Design Challenges“. In: *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* 69.6 (2022), S. 2610–2616. ISSN: 1549-7747. DOI: 10.1109/TCSII.2022.3170317.
- [99] *Richtlinien für die Anlage von Autobahnen: RAA*. Ausgabe 2008. Bd. 202. FGSV R1 - Regelwerke. Köln: FGSV-Verl., 2008. ISBN: 9783939715511.
- [100] T. Ringbeck und B. Hagebeuker. *A 3D time of flight camera for object detection*. Siegen, Germany, 2007. URL: https://www.researchgate.net/publication/266330203_A_3D_time_of_flight_camera_for_object_detection (besucht am 18.07.2023).
- [101] Robert Bosch GmbH. *Laser-Entfernungsmesser GLM 40: Produktdatenblatt: Elektrowerkzeuge für Handwerk & Industrie*. Hrsg. von Robert Bosch GmbH. (Besucht am 16.10.2022).

- [102] RoboSense. *Automotive Grade LiDAR - RS-LiDAR-M1: LiDAR for Autonomous Driving, Robots, V2X*. Hrsg. von Suteng Innovation Technology Co., Ltd. 2023-06-27T15:08:04.000Z. URL: <https://www.robosense.ai/en/rslidar/RS-LiDAR-M1> (besucht am 27.06.2023).
- [103] David Rodríguez-Navarro, José Luis Lázaro-Galilea, Ignacio Bravo-Muñoz, Alfredo Gardel-Vicente, Francisco Domingo-Perez und Georgios Tsirigotis. „Mathematical Model and Calibration Procedure of a PSD Sensor Used in Local Positioning Systems“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 16.9 (2016). DOI: 10.3390/s16091484.
- [104] Ricardo Roriz, Jorge Cabral und Tiago Gomes. „Automotive LiDAR Technology: A Survey“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (2021), S. 1–16. ISSN: 1524-9050. DOI: 10.1109/TITS.2021.3086804.
- [105] Santiago Royo und Maria Ballesta-Garcia. „An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles“. In: *Applied Sciences* 9.19 (2019), S. 4093. DOI: 10.3390/app9194093.
- [106] Ron Rykowski, Doug Kreysar und Sipke Wadman. „9.3: The Use of an Imaging Sphere for High-Throughput Measurements of Display Performance — Technical Challenges and Mathematical Solutions“. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 37 (1) (2006). ISSN: 0097-966X. DOI: 10.1889/1.2433146. URL: https://www.researchgate.net/publication/238102507_93_The_Use_of_an_Imaging_Sphere_for_High-Throughput_Measurements_of_Display_Performance_-_Technical_Challenges_and_Mathematical_Solutions (besucht am 08.04.2023).
- [107] SAE International. *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*. 2014-01-16. URL: https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/.
- [108] Phillip Sandborn. „FMCW Lidar: Scaling to the Chip-Level and Improving Phase-Noise-Limited Performance“. Diss. EECS Department, University of California, Berkeley, 2019-12-01. URL: <http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2019/EECS-2019-148.html>.
- [109] P. Schaefer, R. D. Williams, G. K. Davis und R. A. Ross. „Accuracy of position detection using a position-sensitive detector“. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 47.4 (1998), S. 914–919. ISSN: 00189456. DOI: 10.1109/19.744642.
- [110] Brent Schwarz. „Mapping the world in 3D“. In: *Nature Photonics* 4.7 (2010), S. 429–430. ISSN: 1749-4885. DOI: 10.1038/nphoton.2010.148.

- [111] Hongyan Shang. „Transient response characteristics of position sensitive detector irradiated by moving light source“. In: *Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Optoelectronic Technology and Instruments, Control Theory and Automation, and Space Exploration*. Hrsg. von Jiancheng Fang und Zhongyu Wang. SPIE Proceedings. SPIE, 2008, S. 712904. DOI: 10.1117/12.807371.
- [112] Matityahu Shani, David Eloo, Idan Bakish, Michael Girgel, Moshe Medina, Sasan Sourani, Yair Alpern et al. „LIDAR SYSTEMS AND METHODS“. Pat. US2020393545 (A1). 2020.
- [113] Adnan Shaout, Dominic Colella und S. Awad. *Advanced Driver Assistance Systems - Past, present and future: 27 - 28 Dec. 2011, Giza, Egypt*. Piscataway, NJ, 2011. DOI: 10.1109/ICENC0.2011.6153935. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6146700>.
- [114] David E. Smith, Maria T. Zuber, Gregory A. Neumann, Frank G. Lemoine, Erwan Mazarico, Mark H. Torrence, Jan F. McGarry et al. „Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA)“. In: *Geophysical Research Letters* 37.18 (2010), n/a–n/a. ISSN: 00948276. DOI: 10.1029/2010GL043751.
- [115] Maurice Cohen Solal. „The origin of duo-lateral position-sensitive detector distortions“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 572.3 (2007), S. 1047–1055. ISSN: 01689002. DOI: 10.1016/j.nima.2006.12.042.
- [116] T. Spirig, P. Seitz, O. Vietze und F. Heitger. „The lock-in CCD-two-dimensional synchronous detection of light“. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 31.9 (1995), S. 1705–1708. ISSN: 00189197. DOI: 10.1109/3.406386.
- [117] Jianfeng Sun, Xin Zhou, Zhigang Fan und Qi Wang. „Investigation of light scattering properties based on the modified Li-Liang BRDF model“. In: *Infrared Physics & Technology* 120 (2022), S. 103992. ISSN: 1350-4495. DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103992. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449521003649>.
- [118] TEM Project Central Office. *TEM Standards and Recommended Practice: TRANS-EUROPEAN NORTH-SOUTH MOTORWAY (TEM)*. Poland, 2002. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/tem/temdocs/TEM-Std-Ed3.pdf> (besucht am 03.07.2022).

- [119] Innoviz Technologies. *CARIAD SE Selects Innoviz as Direct LiDAR Supplier for the Segment of Automated Vehicles Within the Volkswagen Brands: Innoviz will provide InnovizTwo LiDAR sensors and perception software*. 2022. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/cariad-se-selects-innoviz-as-direct-lidar-supplier-for-the-segment-of-automated-vehicles-within-the-volkswagen-brands-301597778.html> (besucht am 01.04.2023).
- [120] Rajeev Thakur. „Scanning LIDAR in Advanced Driver Assistance Systems and Beyond: Building a road map for next-generation LIDAR technology“. In: *IEEE Consumer Electronics Magazine* 5.3 (2016), S. 48–54. ISSN: 2162-2248. DOI: 10.1109/MCE.2016.2556878.
- [121] Thorlabs Inc. *Position Sensing Detectors*. Hrsg. von Thorlabs Inc. 2023-04-08T12:02:18.000Z. URL: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4400 (besucht am 08.04.2023).
- [122] Thorlabs. *1" (25 mm) Travel Translation Stages*. Hrsg. von Thorlabs. 2022-07-30T14:49:15.000Z. URL: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=706&pn=PT1/M (besucht am 30.07.2022).
- [123] Thorlabs. *LTS150 and LTS300 Long Travel Stages: User Guide*. Hrsg. von Thorlabs. 6.2022. (Besucht am 30.07.2022).
- [124] Thorlabs. *PDP90A-Manual: 17149-D02*. 20.04.2020. URL: <https://www.thorlabs.de/drawings/a5f3a7f2dfd7d354-56DCFEE4-9C90-B4F6-651DE59465309800/PDP90A-Manual.pdf> (besucht am 16.09.2021).
- [125] Chris Urmson, Joshua Anhalt, Drew Bagnell, Christopher Baker, Robert Bittner, M. N. Clark, John Dolan et al. „Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge“. In: *The DARPA Urban Challenge*. Hrsg. von Bruno Siciliano, Oussama Khatib, Frans Groen, Martin Buehler, Karl Iagnemma und Sanjiv Singh. Bd. 56. Springer Tracts in Advanced Robotics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 1–59. ISBN: 978-3-642-03990-4. DOI: 10.1007/978-3-642-03991-1_1.
- [126] Chris Urmson, Chris Baker, John Dolan, Paul Rybski, Bryan Salesky, William “Red” Whittaker, Dave Ferguson et al. „Autonomous Driving in Traffic: Boss and the Urban Challenge“. In: *AI Magazine* 30.2 (2009), S. 17–28. DOI: 10.1609/aimag.v30i2.2238.
- [127] Valeo Radar Systems Inc. *Radar based Blind Spot Information System: MBX Operating & Integration Manual*. Hrsg. von Valeo Radar Systems Inc. Bietigheim-Bissingen, Deutschland, 2011. URL: <https://fccid.io/UR8303919/User-Manual/>

- Installation-Instructions-pdf-1761562?utm_content=cmp-true (besucht am 05.04.2023).
- [128] Valeo. *Valeo's LiDAR technology, the key to conditionally automated driving, part of the Mercedes-Benz DRIVE PILOT SAE-Level 3 system*. Hrsg. von Valeo. 2022. URL: <https://www.valeo.com/en/valeos-lidar-technology-the-key-to-conditionally-automated-driving-part-of-the-mercedes-benz-drive-pilot-sae-level-3-system/> (besucht am 04.10.2022).
- [129] Valeo. *Valeo's third generation LiDAR chosen by Stellantis for its level 3 automation capability*. Hrsg. von Valeo. Paris, 2022. URL: <https://www.valeo.com/en/valeos-third-generation-lidar-chosen-by-stellantis-for-its-level-3-automation-capability/>.
- [130] Velodyne Lidar. „It Began With a Race...16 Years of Velodyne LiDAR“. In: *Velodyne Lidar* (2017-01-02). URL: <https://velodynelidar.com/blog/it-began-with-a-race16-years-of-velodyne-lidar/> (besucht am 16.10.2022).
- [131] Velodyne Lidar. *VLP-16 User Manual*. Hrsg. von Inc Velodyne LiDAR. 26.02.2019. URL: <https://velodynelidar.com/wp-content/uploads/2019/12/63-9243-Rev-E-VLP-16-User-Manual.pdf> (besucht am 27.06.2023).
- [132] Volkswagen. *“Electric and Electronic Components in Motor Vehicles up to 3.5 t: General Requirements, Test Conditions, and Tests*. 2017-10-01.
- [133] Volvo Car Corporation. *Auf dem Weg zum autonomen Fahren: Kommende Volvo Modellgeneration nutzt LiDAR-Technik von Luminar*. Hrsg. von Volvo Car Corporation. Österreich, 6.05.2020. URL: <https://www.media.volvocars.com/at/de-at/media/pressreleases/268323/auf-dem-weg-zum-autonomen-fahren-kommende-volvo-modellgeneration-nutzt-lidar-technik-von-luminar> (besucht am 19.08.2023).
- [134] Christian Waldschmidt, Juergen Hasch und Wolfgang Menzel. „Automotive Radar — From First Efforts to Future Systems“. In: *IEEE Journal of Microwaves* 1.1 (2021), S. 135–148. DOI: 10.1109/JMW.2020.3033616.
- [135] J. Wallmark. „A New Semiconductor Photocell Using Lateral Photoeffect“. In: *Proceedings of the IRE* 45.4 (1957), S. 474–483. ISSN: 0096-8390. DOI: 10.1109/JRPROC.1957.278435.
- [136] Dingkan Wang, Connor Watkins und Huikai Xie. „MEMS Mirrors for LiDAR: A review“. In: *Micromachines* 11.5 (2020). ISSN: 2072-666X. DOI: 10.3390/mi11050456.
- [137] Mial E. Warren, Hrsg. *Automotive LIDAR Technology: Warren, Mial E*. Piscataway, NJ, USA: IEEE 2019, 2019. ISBN: 9784863487208 4863487207. DOI: 10.23919/VLSIC.2019.8777993.

- [138] Wikipedia, Hrsg. *VW Golf VI*. 2023. URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=VW_Golf_VI&oldid=230113443 (besucht am 01.04.2023).
- [139] Hermann Winner, Stephan Hakuli, Felix Lotz und Christina Singer. *Handbook of Driver Assistance Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2016. ISBN: 978-3-319-12351-6. DOI: 10.1007/978-3-319-12352-3.
- [140] H. J. Woltring. „Single- and dual-axis lateral photodetectors of rectangular shape“. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 22.8 (1975), S. 581–590. ISSN: 0018-9383. DOI: 10.1109/T-ED.1975.18181.
- [141] Han Woong Yoo, David Brunner, Thomas Thurner und Georg Schitter. „MEMS Test Bench and its Uncertainty Analysis for Evaluation of MEMS Mirrors“. In: *IFAC-PapersOnLine* 52.15 (2019), S. 49–54. ISSN: 24058963. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.648.
- [142] Han Woong Yoo, Norbert Druml, David Brunner, Christian Schwarzl, Thomas Thurner, Marcus Hennecke und Georg Schitter. „MEMS-based lidar for autonomous driving“. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 135.6 (2018), S. 408–415. ISSN: 0932-383X. DOI: 10.1007/s00502-018-0635-2.
- [143] Junko Yoshida. „Ouster Takes on Waymo with Lidar Diversity“. In: *EE Times* (2020-07-14). (Besucht am 27.06.2023).
- [144] Junnko Yoshida. *Teardown: Lessons Learned From Audi A8*. Hrsg. von EE Times ASIA. 2020. URL: <https://www.eetasia.com/teardown-lessons-learned-from-audi-a8/> (besucht am 04.10.2022).
- [145] Jiyou Zhang, Tianquan Fan und Xuedong Cao. „Dynamic photoelectric autocollimator based on two-dimension position sensitive detector“. In: *3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment*. Hrsg. von Junhua Pan, James C. Wyant und Hexin Wang. SPIE Proceedings. SPIE, 2007, S. 672315. DOI: 10.1117/12.783135.
- [146] Zhengyou Zhang. *A Flexible New Technique for Camera Calibration*. Hrsg. von Microsoft Research. Redmond, WA 98052, 1998. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/tr98-71.pdf> (besucht am 14.12.2019).
- [147] Zhi Li, Zihan Zang, Yaqi Han, Lican Wu und Hongyan Fu. „Solid-state FMCW LiDAR with two-dimensional spectral scanning using virtually imaged phased array“. In: *Optics express* 29.11 (2021). DOI: 10.1364/OE.418003. URL: <https://unece.org/DAM/trans/main/tem/temdocs/TEM-Std-Ed3.pdf>.

- [148] www.euroncap.com, Hrsg. *European New Car Assessment Programme (Euro NCAP): Test Protocol - AEB Car-to-Car systems*. April 2021. URL: <https://cdn.euroncap.com/media/62794/euro-ncap-aeb-c2c-test-protocol-v303.pdf> (besucht am 12.02.2022).

Eigene Veröffentlichungen

- [149] Valentin Baier, Michael Schardt, Maximilian Fink, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. „MEMS-Scanner Testbench for High Field of View LiDAR Applications“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 22.1 (2021). DOI: 10.3390/s22010039.
- [150] Dominic Lakatos, Markus Rauscher, Michael Schardt, Valentin Baier, Maximilian Schermer und Mathias Hofmann. „Verfahren und Vorrichtung zur Kalibrierung einer Scaneinheit“. Pat. DE 10 2020 110 391 A1. 2021.
- [151] Maximilian Fink, Michael Schardt, Valentin Baier, Kun Wang, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. *Full-Waveform Modeling for Time-of-Flight Measurements based on Arrival Time of Photons*. 2022. URL: <https://arxiv.org/pdf/2208.03426>.
- [152] Maximilian Fink, Michael Schardt, Valentin Baier, Kun Wang, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. „Low-cost scanning LIDAR architecture with a scalable frame rate for autonomous vehicles“. In: *Applied optics* 62.3 (2023), S. 675–682. DOI: 10.1364/AO.479765.
- [153] A. W. Koch, M. Jakobi, V. Baier, Müller M.S. und F. et al. Petit. „Forschung auf dem Gebiet der LiDAR-Scanner für das Einsatzgebiet „autonomes Fahren“ am Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik (MST) der Technischen Universität München (TUM)“. In: *Jahresmagazin Ingenieurwissenschaften Deutschland 2017/18: Mess- und Sensortechnik* (2017).

Betreute studentische Arbeiten

- [154] „Analog Front-End Design of a Multichannel Photon Detector for LiDAR Applications“. Masterarbeit. München: TUM, Dezember 2020.
- [155] „Analog-Front-End Design of an Avalanche Photodiode Based LiDAR Receiver“. Masterarbeit. München: TUM, Mai 2021.
- [156] „Automated Lane Layer Generation of HD Maps based on Sparse Fleet Data using Convolutional Neural Networks“. Masterarbeit. München: TUM, April 2023.

-
- [157] „Automated Processing of IMU Data from a LiDAR System“. Bachelorarbeit. München: TUM, Juli 2020.
- [158] „Automation of the System Identification of a Solid State MEMS Mirror“. Masterarbeit. München: TUM, Oktober 2021.
- [159] „Camera-Aided LIDAR Pedestrian Perception for Social Distancing Measurements“. Bachelorarbeit. München: TUM, Juni 2021.
- [160] „Camera-based Pose Estimation of an Elliptical MEMS Mirror Using a Tip-tilt System“. Masterarbeit. München: TUM, Mai 2021.
- [161] „Design and implementation of a measurement setup to determine the optical deflection of an oscillating MEMS mirror“. Forschungspraxis. München: TUM, März 2021.
- [162] „Design of a Magnetic Field Sensing Concept for the State Estimation of a Nonlinear Oscillating MEMS Mirror“. Masterarbeit. TUM, Juli 2022.
- [163] „Design of an Automated Testbench for Laser Pulse Characterization“. Bachelorarbeit. TUM, Januar 2023.
- [164] „Development of SSL in an Embedded Web Server and Design of an Automatic Code Generation Pipeline for Control Systems“. Forschungspraxis. München: TUM, August 2020.
- [165] „Development of a Camera-based System for the Automatic Evaluation of the Customer-oriented Appearance of Vehicle Exterior Light“. Masterarbeit. TUM, Januar 2022.
- [166] „Development of a Laser Driver PCB with Optimized Heat Dissipation“. Masterarbeit. München: TUM, September 2021.
- [167] „Development of an Automated Hardware-in-the-Loop System Test Bench for LiDAR Sensors“. Masterarbeit. München: TUM, Juli 2021.
- [168] „Entwicklung eines Tests zur Bestimmung der maximalen Reichweite eines LiDAR-Systems unter Tageslichteinfluss“. Masterarbeit. TUM, Mai 2022.
- [169] „Entwicklung eines Wahrnehmungssystems auf Basis stationärer Monokameras zur Detektion von Fußgängern“. Bachelorarbeit. München: TUM, September 2021.
- [170] „Entwicklung eines skalierbaren Sensorverbunds für automatisiertes Fahren“. Ingenieurspraxis. München: TUM, Mai 2020.
- [171] „Evaluierung eines Konzepts zur LiDAR-basierten Fußgängerdetektion in Innenräumen“. Forschungspraxis. München: TUM, September 2022.

-
- [172] „Fault detection of the wiring of sensors in prototype vehicles“. Ingenieurpraxis. München: TUM, Dezember 2020.
- [173] „Filtering of Sparsely Populated Point Clouds Based on 3D Ultrasonic Data“. Bachelorarbeit. München: TUM, März 2021.
- [174] „Grundlagen der Sensorfusion eines Radar- und eines Bildsensors für Automotive-Anwendungen“. Masterarbeit. München: TUM, Mai 2021.
- [175] „Implementation of a LiDAR-based Indoor Mapping Algorithm Using a Scaled Vehicle“. Forschungspraxis. München: TUM, April 2023.
- [176] „Ingenieurspraxis bei ZF Friedrichshafen AG“. Ingenieurpraxis. München: TUM, September 2021.
- [177] „Klassifizierung von Opfern in einem Massenanfall von Verletzten durch künstliche Intelligenz“. Semesterarbeit. München: TUM, Juni 2022.
- [178] „Konzept eines Time-Of-Flight basierten Sicherheitssensors für die Lasermaterialbearbeitung“. Masterarbeit. München: TUM, März 2020.
- [179] „Konzeptionierung und Implementierung eines KI-basierten Fahrermodells zur Verbrauchsoptimierung batterieelektrischer Fahrzeuge“. Forschungspraxis. München: TUM, August 2021.
- [180] „Laser Parameter Deviations over Temperature of a LiDAR System“. Forschungspraxis. München: TUM, Januar 2021.
- [181] „LiDAR-Based Multi-Region Object Detection of Hand Gestures“. Bachelorarbeit. München: TUM, Februar 2023.
- [182] „Long-term temperature and electrical voltage dependence on the displacement range of piezoelectric actuators used in a LIDAR sensor“. Forschungspraxis. München: TUM, Januar 2022.
- [183] „Measurement Assisted, Automated Assembly Setup for Precise Bonding Applications“. Masterarbeit. TUM, September 2022.
- [184] „Measuring LiDAR Range Accuracy with Optical Fibers and Noise Filtering“. Masterarbeit. München: TUM, November 2020.
- [185] „Modellierung und Evaluierung eines optimierten Empfangssystems für 3D Ultraschallsensoren“. Masterarbeit. München: TUM, Dezember 2021.
- [186] „Modulentwicklung für eine autonome Echtzeitsteuerung eines schienengebundenen Transportsystems im Maßstab 1:10“. Forschungspraxis. München: TUM, Oktober 2020.

-
- [187] „Non-Contact in-Cabin Heart Rate Estimation“. Masterarbeit. München: TUM, Juni 2023.
- [188] „Observability analysis of a highly nonlinear solid state MEMS mirror“. Semesterarbeit. München: TUM, Februar 2021.
- [189] „Optimal Path Generation for indirect Teleoperated Driving in urban Environment“. Masterarbeit. München: TUM, September 2020.
- [190] „Optimization of Latency Critical Neural Networks on Accelerated Embedded Devices“. Forschungspraxis. München: TUM, Mai 2023.
- [191] „Optimization of a Control Algorithm by using a CORDIC Co-Processor“. Forschungspraxis. München: TUM, April 2021.
- [192] „Proof of Concept for a Highly Dynamical and Accurate Measurement System to Track the Motion of MEMS Mirrors Based on Confocal Distance Measurement“. Forschungspraxis. München: TUM, Mai 2021.
- [193] „Prototypenentwicklung eines autonomen Hubwagens für den Boden-Boden-Transport von Paletten“. Forschungspraxis. München: TUM, April 2020.
- [194] „Radar Detection Software and Testing Engineering Data Analysis“. Ingenieurpraxis. München: TUM, Oktober 2021.
- [195] „Realisierung eines Überwachungsframeworks für HiL-Rechner“. Ingenieurpraxis. München: TUM, Juli 2022.
- [196] „Redesign and Comparison of a Laser Board with Chip-on-board and full SMD Process“. Bachelorarbeit. TUM, Juni 2022.
- [197] „Shaker – Befestigung zur Abschwächung von Magnetischen Feldern für Vibrationsstest von LiDAR –Strahlableinheiten“. Forschungspraxis. München: TUM, Oktober 2020.
- [198] „Two-Staged Segmentation for Point Cloud Refinement for Autonomous Driving“. Forschungspraxis. München: TUM, Januar 2023.
- [199] „Vermessung von Wireless-Charging-Ablagen in Fahrzeugen“. Ingenieurpraxis. München: TUM, Januar 2023.
- [200] „Volume Monitoring in Industrial Applications with Stationary 3D Solid-State Smart LiDARs“. Masterarbeit. München: TUM, August 2023.
- [201] „Weiterentwicklung eines Verfahrens zur Kalibrierung von Gurtkraftsensoren“. Bachelorarbeit. München: TUM, August 2022.

