



Aufgabenblatt für die Diplomarbeit

im Studiengang / Studienrichtung **Fahrzeugtechnik / Kraftfahrzeugtechnik**

Name des Diplomanden / Matrikel-Nr.: **Darius Schwarze / 49198**

Thema **Entwicklung einer Kennzeichenerkennung mithilfe eines LiDARs mit dem Ziel, den Verschmutzungsgrad des Sensors sowie die Witterung abzuschätzen**

Im Rahmen der Diplomarbeit werde ich für drei LiDAR-Typen einen Algorithmus zur Kennzeichenerkennung entwickeln. Anschließend untersuche ich anhand bestehender und eigener Messungen die Intensitäten auf Abhängigkeit von Umwelteinflüssen, um daraufhin eine Verschmutzungs- und Witterungserkennung zu entwickeln. In der Diplomarbeit sollen daher unter anderem das Verhalten von Laserstrahlen und die Abhängigkeit von Umwelteinflüssen genauer betrachtet sowie die Vorgehensweise bei der Programmierung der Algorithmen dokumentiert werden.

Arbeitspunkte:

- Entwicklung eines Algorithmus zur Kennzeichenerkennung für drei verschiedene LiDAR-Typen
- Untersuchen der Intensitäten in Abhängigkeit von Witterung und LiDAR-Verschmutzung
- Durchführen von Tests mit verschieden starker Verschmutzung
- Entwicklung einer Verschmutzungs- und Witterungserkennung für LiDAR

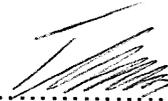
Die Ergebnisse der Arbeit sind in einem Poster zu dokumentieren.

Betreuer HTW: Prof. Dr. rer. nat. Toralf Trautmann
Dipl.-Ing. (FH) Dirk Engert
Dipl.-Ing. (FH) Franziskus Mendt

Ausgehändigt am: 29.04.2024

Einzureichen bis: 30.09.2024


.....
Prof. Dr. rer. nat. Toralf Trautmann
Verantwortlicher Hochschullehrer



.....
Prof. Dr.-Ing. Thomas Himmer
Prüfungsausschussvorsitzender

Hinweise zum Erstellen der Diplomarbeit unter

<https://www.htw-dresden.de/hochschule/fakultaeten/maschinenbau/studium/diplomsemester>

Die Aufgabenstellung kann nach Absprache und dem Vorliegen von Teilergebnissen erweitert bzw. eingengt werden.

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Fakultät Maschinenbau



Diplomarbeit

„Entwicklung einer Kennzeichenerkennung mithilfe eines LiDARs mit dem Ziel, den Verschmutzungsgrad des Sensors sowie die Witterung abzuschätzen“

eingereicht von: Darius Schwarze
Matrikelnummer: 49198
Fakultät: Maschinenbau
Studiengang: Fahrzeugtechnik

betreut durch: Prof. Dr. rer. nat. Toralf Trautmann
Dipl.-Ing. (FH) Franziskus Mendt

Abgabedatum: 03.09.2024

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Laserprinzip	3
2.2 Eigenschaften des Laserlichtes.....	3
2.3 Laserscanner	7
2.3.1 Messung der Objektentfernung	7
2.3.2 Messung der Bestrahlungsstärke	10
2.3.3 Störeinflüsse	13
2.4 Verwendete Umfeldsensorik.....	14
2.5 Fahrzeugkennzeichen.....	17
2.5.1 Montage und Beschriftung.....	17
2.5.2 Abmessungen	18
2.5.3 Reflexionseigenschaften	19
2.5.4 Aufbau üblicher Reflexfolien	20
3 Konzept	23
3.1 Messaufbau	23
3.4 Datenvorverarbeitung.....	24
3.5 Etablierte Filteralgorithmen	25
3.6 Gewählte Filteralgorithmen	27
3.7 Klassifizierung der Messpunkte.....	28
3.8 Nässebedingte Spiegelungen.....	29
3.9 Rauschpunktanalyse.....	29
4 Umsetzung und Implementierung	31
4.1 Datenvorverarbeitung.....	31
4.1.1 Einlesen der Daten.....	31
4.1.2 Datenreduktion.....	32
4.1.3 Koordinatentransformation	35

4.2	Kennzeichenerkennung	35
4.2.1	CropBox-Filter.....	36
4.2.2	Bodensegmentierung.....	37
4.2.3	Intensitätsfilterung.....	37
4.2.4	Dichtebasierte Clusterung.....	40
4.2.5	Größenfilterung.....	42
4.2.6	Form- und Intensitätsbasierte Clusterung	43
4.2.7	Segmentierung des Trägerobjekts	47
4.2.8	Lagebeziehung	52
4.2.9	Instanzsegmentierung.....	53
4.3	Verschmutzungserkennung	54
4.3.1	Quantifizierung der Verschmutzungsstärke.....	54
4.3.2	Sensorspezifische Besonderheiten	56
4.3.3	Abstufung	58
4.4	Witterungserkennung.....	59
4.4.1	Fahrbahnfeuchtigkeit	60
4.4.2	Niederschlag.....	64
5	Auswertung	68
5.1	Messergebnisse	68
5.1.1	Typisierung der Häufigkeitsverteilung	68
5.1.2	Objektentfernung	70
5.1.3	Verwitterung des Kennzeichens	71
5.1.4	Einfallswinkel	74
5.1.5	Verschmutzung Sensorscheibe.....	75
5.1.6	Witterung	77
5.1.7	Geschwindigkeit.....	79
5.2	Validierung der Kennzeichenerkennung.....	79
6	Zusammenfassung	82
	Literaturverzeichnis	86
	Eidesstattliche Erklärung	89
	Anlagenverzeichnis	90

Abkürzungsverzeichnis

db3	database 3
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise
IP-Schutzklasse	Ingress Protection- Schutzklasse
LiDAR	Light Detection And Ranging
livx-Dateiformat	proprietäres Livox -Dateiformat
mat-Dateiformat	proprietäres Matlab -Dateiformat
pcap-Dateiformat	Packet Capture -Dateiformat
pcd-Dateiformat	Point Cloud Data -Dateiformat
SMRF	Simple Morphological Reconstructive Filter
ROI	Region Of Interest
ROS2	Robot Operating System 2

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Laserscanner

Symbol	Einheit	Bedeutung
e	-	Eulerzahl
c_{Licht}	m/s ²	Lichtgeschwindigkeit
d_{Gitter}	m	Gitterweite
E, I	W/m ²	Bestrahlungsstärke, Intensität
f_q	Hz	Resonanzfrequenz
f_{Scan}	Hz	Scanrate
Δf	nm	Linienbreite
j	-	Index aufeinanderfolgender Punkte in sortierter Matrix
s	cm	Länge Kreissehne
Δt	ns	Lichtlaufzeit
v	%	Verschmutzungsdichte
w_0	mm	halber Durchmesser Strahltaile
ε	°	Winkel zwischen Kreissehne und Horizontalen
θ_0	°	halber Strahlöffnungswinkel
λ	nm	Wellenlänge
π	-	Kreiszahl
Φ_0	W	Sendeleistung
X_{vert}, X_{hor}	°	vertikaler/ horizontaler Sensoröffnungswinkel
$\Delta X_{vert}, \Delta X_{hor}$	°	vertikaler/ horizontaler Auflösung

Objekt

A	mm ²	Fläche
b	m	Breite
r	m	Objektentfernung
G_i	-	Gesamtbewertung
h	m	Höhe
m	-	Anstieg Regressionsgerade

n	-	Anzahl
R	-	radiometrischer Rückstrahlwert, Reflektivität
RK	-	Reflektivitätskennzahl
T	cm	Toleranzbreite der Bodenpunkte
α, α_G	°	Einfallswinkel, Grenzwinkel
β	°	Objektschrägstellung

Koordinatensystem

B_k	-	Basis des ursprünglichen Koordinatensystems
C	-	Matrix mit Koordinaten der Quadereckpunkte
d_{Lot}	m	Lotfußpunktabstand
$\vec{e}_{xk}, \vec{e}_{yk}, \vec{e}_{zk}$	-	Einheitsvektoren der Koordinatenachsen
M_i	-	Matrix: Koordinaten der Eckpunkte der Quaderfläche i
$M_{i'}$	-	Matrix der verschobenen Quaderfläche i
\vec{n}_E	-	Normalenvektor an Bodenebene
\vec{s}	-	Verschiebungsvektor
$\vec{v}_k, \vec{v}_{Spiegel}$	-	Ortsvektor eines allgemeinen, gespiegelten bzw.
$\vec{v}_{proj.}$	-	projizierten Punktes
V_{xk}, V_{yk}, V_{zk}	-	Komponenten des Richtungsvektors
φ	°	Rotationswinkel um z-Achse

Statistische Kenngrößen

IQR	-	Interquartilsabstand
k	-	Anzahl der Intervalle im Histogramm
N	-	Stichprobengröße
Q_i	-	Quartil i-ter Ordnung
W	-	Spannweite
γ_m	-	Schiefe (Asymmetrie)
μ	-	Erwartungswert
σ	-	Standardabweichung
$\hat{\omega}$	-	Kurtosis (Wölbung)

Abbildungsverzeichnis

2.1	allgemeiner Aufbau eines Lasers	3
2.2	Intensität abhängig von Linienbreite.....	4
2.3	Strahldivergenz.....	5
2.4	Streuung und Reflexion an Oberflächen	6
2.5	vereinfachter Aufbau und Strahlenverlauf eines Laserscanners	8
2.6	Time to Digital Converter	9
2.7	Reflexionsdreieck der Laserstrahlen bei Vermessung eines Objekts	10
2.8	Einfluss eines Schmutzpartikels auf Lichtausbreitung.....	13
2.9	Kumulierung des Scanmusters	16
2.10	Sichtfeld-Abdeckung in Abhängigkeit der Integrationszeit.....	16
2.11	mögliche Kennzeichenformate.....	18
2.12	Reflexfolienaufbau mit eingebundenen Mikroglasperlen	20
2.13	Reflexfolienaufbau mit eingekapselten Mikroglasperlen.....	21
2.14	Reflexfolienaufbau mit mikroprismatischen Reflexkörpern	21
3.1	Messaufbau	23
3.2	sensorspezifische Datenvorverarbeitung	25
3.3	zweistufige Segmentierung der Verkehrszeichen.....	25
3.4	Ermittlung der optimalen Intensitätsgrenze	26
3.5	Eigenschaften der Kennzeichen als Filterparameter	27
3.6	sensorinterne Klassifikation der Messpunkte	28
3.7	Entstehung eines scheinbaren Objekts unter der Bodenebene.....	29
3.8	Beobachtungsquader für die Auswertung der Anzahl der Rauschpunkte	30
4.1	Kumulierung mehrerer Punktwolken	32
4.2	Anwendung des VoxelGrid-Filters.....	33
4.3	Grenzfälle der Kennzeichenerkennung aufgrund hoher Objektentfernung,	34
4.4	Intensitätsfilterung.....	40
4.5	stufenweise Segmentierung.....	41
4.6	gruppenbasierte Größenfilterung	42
4.7	Nachbearbeitung durch Intensitätsverteilungs- und Formanalyse	43
4.8	geometrische Herleitung der optischen Breite des Kennzeichens.....	44
4.9	Verschiebungsbereich des Rechtecks in der y-z-Ebene.....	45

4.10	Bewertung der Messgrößen	45
4.11	finale Bewertung der Mittelpunkte	46
4.12	Schild am Zaun als potenzielles Kennzeichen	47
4.13	Segmentierung des Trägerobjekts	48
4.14	Volumenminimierung des Quaders	49
4.15	Anpassung des Quaders an Punktwolke des Kleinkraftrades	51
4.16	Auswahl des korrekten Segments anhand der Lagebeziehung	52
4.17	Wahl der Methode zur Abstandsberechnung	52
4.18	Überführen erkannter Kennzeichen in Objektstruktur	53
4.19	Umwandlung des Farbbildes in ein Schwarz-Weiß-Bild	54
4.20	Einordnung der Verschmutzungen anhand der Verschmutzungsdichte	55
4.21	Abhängigkeit der Nahbereichsreflexionen von der Verschmutzungsdichte	57
4.22	Abhängigkeit des Intensitätsmittelwerts von der Verschmutzungsdichte	58
4.23	Sichtbeeinflussung in den drei Verschmutzungsstufen	59
4.24	segmentierte Punktwolke mit nässebedingten Spiegelungen	60
4.25	Vergleich Fahrbahnnässe	61
4.26	Projektion des geometrischen Schwerpunkts	63
4.27	Abhängigkeit der Rauschpunktanzahl	64
4.28	Häufigkeitsverteilung der Punktanzahl pro Zelle	66
5.1	Analyse der Häufigkeitsverteilung der Intensitätswerte einer Messung	68
5.2	Erwartungswert in Abhängigkeit der Kennzeichenentfernung	70
5.3	verfügbare Kennzeichen	71
5.4	schrittweise Umwandlung des zugeschnittenen Farbbildes	72
5.5	Erwartungswert in Abhängigkeit des Kennzeichenzustands	73
5.6	Variation des Einfallswinkels	74
5.7	Abhängigkeit des Erwartungswertes vom Einfallswinkel	75
5.8	Abhängigkeit des Erwartungswertes von der Verschmutzungsdichte	76
5.9	statisches Szenario der Witterungsmessungen	77
5.10	Abhängigkeit des Erwartungswertes von der Niederschlagsmenge	78
5.11	dynamische Messung zur Validierung der Kennzeichenerkennung	80

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich radiometrischer und photometrischer Größen	12
2.2	technische Daten der drei relevanten Laserscanner	14
2.3	Kombinationsmöglichkeiten der Kennzeichenabmessungen.....	18
2.4	Reflexionsklassen.....	22
3.1	Einflussfaktoren und deren Variationswerte	24
4.1	sensorspezifische Transformationswinkel	35
4.2	sensorspezifische Entfernungsgrenzwerte.....	36
4.3	Ermittlung des Intensitätsschwellwertes.....	39
4.4	Besonderheiten der Verschmutzungsstufen.....	59
4.5	sensorspezifische Witterungsabstufung	65
5.1	analysierte statistische Kenngrößen	69
5.2	Begriffe für die Leistungsbewertung der Kennzeichenerkennung.....	79
5.3	Ergebnisse der Validierung der Kennzeichenerkennung	81

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch die zunehmende Bedeutung automatisierter Anwendungen sowohl in der Industrie als auch im Verkehrssektor entsteht eine erhöhte Nachfrage nach präzisen und effizienten Methoden, mit denen das Umfeld abgebildet und verarbeitet werden kann. Da diese Anforderungen von Laserscannern in besonders hohem Maß erfüllt werden, gelten sie als entscheidendes Schlüsselement innerhalb der Objekterkennung. Die LiDAR-Sensoren (engl. *Light Detection And Ranging*) senden und empfangen Laserpulse, ermöglichen damit eine hochpräzise dreidimensionale Erfassung der Umgebung und sind in der Lage, selbst kleinste Details zuverlässig zu erkennen. Ferner erfassen sie die Reflexionseigenschaften der Objekte. Dieses Potential kann allerdings nur als Vorteil genutzt werden, wenn die Sensorscheibe nahezu keine Ablagerungen aufweist. Aus dieser Bedingung geht die Motivation hervor, eine Verschmutzungserkennung zu entwickeln, um vorzeitig einen Systemausfall zu verhindern. Die Grundidee hierbei besteht in der Analyse von Referenzobjekten, welche durch eine Verschmutzung an der Sensorscheibe Auffälligkeiten in den betrachteten Eigenschaften aufweisen. Um solche Abweichungen in den Objekteigenschaften feststellen zu können, muss der Bezugsgegenstand über einen gewissen Zeitraum verfolgt und untersucht werden. Fahrzeugkennzeichen haben hinsichtlich dieser Anforderung das größte Potential. Einerseits lassen sie sich aufgrund ihrer Reflexionseigenschaften robust aus dem Fahrzeugumfeld extrahieren. Zum anderen sind sie ausschließlich an Fahrzeugen angebracht und können daher beispielsweise anhand eines vorausfahrenden Fahrzeugs über einen langen Zeitraum analysiert werden. Ferner bleibt zu überprüfen, ob diese Referenzobjekte für eine Abschätzung der Witterung genutzt werden können, um beispielsweise eine Störung im Messbetrieb infolge Nebel, Regen oder Schnee zu erkennen. Hierbei wird parallel die Feuchtigkeit der Fahrbahn ermittelt.

Perspektivisch kann die Kennzeichenerkennung nicht nur als Vorverarbeitung für die Störungserkennung, sondern ebenso für die Evaluierung neuer Messungen genutzt werden. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass die Messtechnik ordnungsgemäß funktioniert, wenn mindestens ein Kennzeichen über einen längeren Zeitraum verfolgt werden konnte. Damit das betreuende Personal der Messtechnik selbst die Messung validieren kann, können zusätzlich die Punktwolken mit den klassifizierten Kennzeichen visualisiert werden.

In der umfangreichen Literatur- und Patentrecherche wurden keine LiDAR-basierten Algorithmen zur Erkennung von Kennzeichen, der LiDAR-Verschmutzung oder der Witterung beziehungsweise der Fahrbahnfeuchtigkeit gefunden. Mithilfe dieser Arbeit wird daher der Grundstein für nützliche Innovationen im Bereich der Umfelderkennung gelegt.

1.2 Zielstellung

Aus dem genannten Zusammenhang der drei Erkennungsalgorithmen leitet sich der Rahmen dieser Arbeit ab. Im ersten Schritt wird eine Kennzeichendetektion entwickelt. Anschließend ist zu prüfen, ob eine darauf aufbauende Implementierung einer Verschmutzungs- sowie Witterungsdetektion sinnvoll ist. Andernfalls sind alternative Konzepte zu entwickeln und umzusetzen. Hierfür werden eigene Messungen durchgeführt, in denen unter anderem die Abhängigkeit der Messergebnisse vom Verschmutzungsgrad des Laserscanners untersucht wird. Aufgrund der umfangreichen Thematik wird auf die Implementierung eines Trackingalgorithmus innerhalb der Kennzeichenerkennung sowie auf die Messanalyse dynamischer Szenarien verzichtet.

Das Ziel des Kennzeichenalgorithmus ist die Erkennung der Fahrzeugkennzeichen aus den LiDAR-Daten der drei Laserscanner. Die Messwerte der Laserscanner der Hersteller Ouster, Livox und Leishen werden separat betrachtet, weshalb eine Fusionierung der Daten vermieden wird. Die Umsetzung der Algorithmen erfolgt mithilfe von Matlab. Die Gründe für die Wahl dieser Programmierumgebung sind vorrangig die simple Syntax und der große Umfang an Visualisierungsmöglichkeiten. Bei der Wahl der Berechnungsmethode ist vorzugsweise diejenige zu verwenden, die weniger Rechenzeit benötigt, um nachfolgenden Arbeiten die Generierung der Echtzeitfähigkeit zu erleichtern. Perspektivisch wird daher angestrebt, dass die Erkennung der Nummernschilder während der laufenden Messung erfolgt. Somit kann das Messpersonal parallel zum Messbetrieb die aufgenommenen Daten validieren, um im Fehlerfall die Messung abbrechen und direkt wiederholen zu können. Da für die echtzeitfähige Kennzeichenerkennung eine Implementierung in ROS2 oder Python vorgesehen ist, werden die Algorithmen nach Möglichkeit plattformunabhängig programmiert. Das impliziert, dass möglichst wenige Funktionen verwendet werden, die zwar in der Matlab-Bibliothek, aber nicht in Python oder ROS2 verfügbar sind. Auf die vereinzelt übernommenen Matlab-Funktionen wird im Text anhand der Befehlsbezeichnung verwiesen. Eine detaillierte Beschreibung dieser vorgefertigten Methoden kann in der Matlab-Dokumentation nachgelesen werden [1].

Auf Grundlage der genannten Anforderungen werden im Folgenden theoretische Betrachtungen aufgeführt, um essenzielle Kenntnisse für die darauffolgende Konzeptentwicklung zu gewinnen. Der Großteil dieser Abhandlung beschäftigt sich mit der Vorgehensweise der Konzeptumsetzung, um der Leserschaft die Funktionsweise der Algorithmen verständlich zu erläutern und Unklarheiten für eventuelle Folgearbeiten zu verhindern. Schlussendlich werden die durchgeführten Messungen sowie die Kennzeichenerkennung ausgewertet.

2 Theoretische Grundlagen

Um die Zusammenhänge hinsichtlich Reflektivität, Beugung, Brechung und weiterer Laserstrahlverhalten verstehen zu können, wird als Grundlage die Funktionsweise eines Lasers und die Entstehung eines Laserstrahles, wie er beispielsweise in Laserscannern erzeugt wird, erklärt.

2.1 Laserprinzip

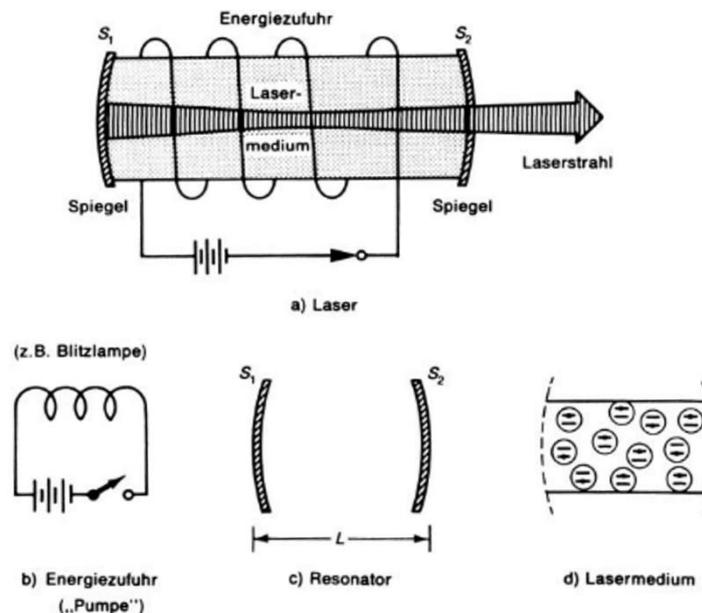


Abbildung 2.1: allgemeiner Aufbau eines Lasers [2]

Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau eines Lasers. Die Energiezufuhr (b) sorgt dafür, dass das Lasermedium (d) elektromagnetische Strahlung emittiert. Diese wird im Resonator (c), der aus Endspiegel (S_1) und Auskoppelspiegel (S_2) besteht, mehrfach reflektiert. Der Auskoppelspiegel lässt einen kleinen Teil der Strahlung in Form von Licht durch. Aufgrund der konkaven Geometrie wird der Lichtstrahl bereits im inneren des Lasers gebündelt. Die stimulierte Emission sowie die Besetzungsemission bewirken die Verstärkung des Laserlichtes. Nähere Erläuterungen bezüglich der Funktionsweise sind der Fachliteratur zu entnehmen. [2]

2.2 Eigenschaften des Laserlichtes

Die beschriebene Entstehung des Laserlichtes ist der Grund für dessen charakteristische Eigenschaften. Die bedeutendsten Merkmale werden im Folgenden beschrieben.

Das Laserlichtes ist **monochromatisch**. Das heißt, dass die Wellenfrequenz der emittierten Strahlung konstant ist. Daher nimmt das Auge die Laserstrahlen als einfarbiges Licht wahr. Welche Farbe ein Laser emittiert, hängt vom Medium ab, welches die Strahlen erzeugt.

Häufig kommen Rubinlaser zum Einsatz, welche rotes Licht aussenden. Des Weiteren ist die Phasenverschiebung aller Lichtwellen konstant. Sie sind **kohärent**, da der Abstand beider Resonatorspiegel ein Vielfaches der emittierten Wellenlänge ist. Hierbei wird zwischen zeitlicher Kohärenz (Einfarbigkeit) und der räumlichen Kohärenz unterschieden. Letztere ist eine Sonderform der zeitlichen Kohärenz und tritt auf, wenn die Wellenfronten, welche die gleiche Phasenverschiebung aufweisen, übereinander liegen. [2]

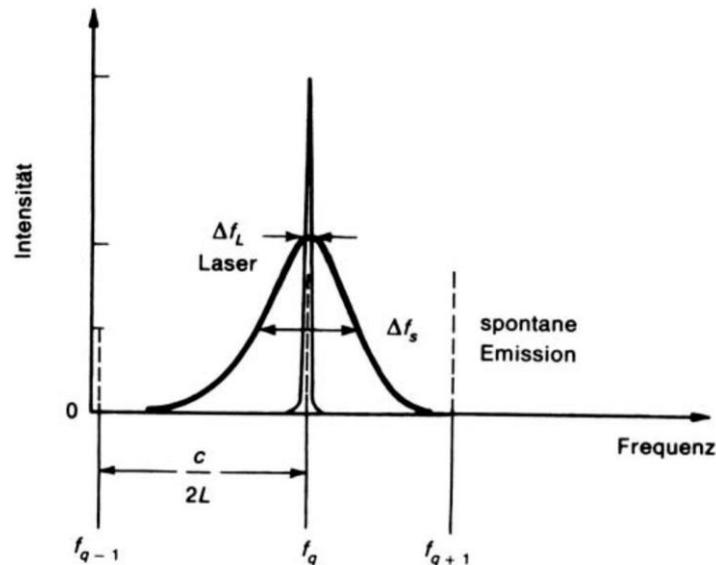


Abbildung 2.2: Intensität abhängig von Linienbreite [2]

Abbildung 2.2 zeigt die Verteilung der Intensität bei spontaner Emission und im Laserbetrieb. Die höhere **Intensität** gegenüber Lichtquellen mit spontaner Emission, wie beispielsweise Glühlampen, ist eindeutig erkennbar. Die Linienbreite Δf gibt an, wie groß der Frequenzbereich des emittierten Lichtes ist. Wird sie an der Hälfte der maximalen Intensität angetragen, handelt es sich um die Bandbreite. Mit dieser kann eine sichere Aussage über die Abweichungen der Wellenlängen von der Resonanzfrequenz f_q getroffen werden. Die Resonanzfrequenz ist für jede Bauart unterschiedlich und gibt an, bei welcher Frequenz die Wellen im Resonator verstärkt werden. Ziel ist es, dass die gesamte Strahlung diese Resonanzfrequenz aufweist. Für diesen theoretischen Fall strebt die Intensität gegen unendlich. Folglich ist dieser Wert umso größer, je stärker sich der Laser an den perfekten monochromatischen Betrieb, in dem nur eine Wellenlänge emittiert wird, annähert. Hierbei ist zu beachten, dass das beschriebene Diagramm nur für den stationären Laserbetrieb gilt. In diesem Betriebszustand emittiert der Laser kontinuierlich Licht mit gleichbleibender Intensität und Wellenlänge, ohne wesentliche Schwankungen oder Pulsierungen. Da jeder Laser aufgrund des implementierten Lasermediums und der Bauform eine spezifische Frequenz und Linienbreite aufweist, variiert die Intensität der abgegebenen Strahlung zwischen den Lasertypen. Demnach besitzt ein Laser eine definierbare Linienbreite und damit auch eine vorhersehbare Intensität. Das gilt jedoch nur, wenn der Resonator regel-

mäßig exakt kalibriert und justiert wird. Dass selbst bei Einhaltung dieser Maßnahmen eine Abweichung von der Resonanzfrequenz f_q besteht, resultiert aus Eigenschwingungen, Verlusten im Resonator sowie Beugungs- und Streueffekten. Bei mobilen Laserscannern werden die Prüfindervalle aus Gründen der Wirtschaftlichkeit erfahrungsgemäß selten eingehalten. Im Gegenzug muss daher eine größere Bandbreite und dadurch eine verringerte Intensität toleriert werden. Alternativ kann eine Filterung der Wellenlängen erfolgen. Dies verkleinert zwar die Bandbreite, jedoch ist damit ein starker Intensitätsverlust verbunden. [2]

Hinsichtlich der Umfelderfassung bieten Laser einen weiteren Vorteil. Sie haben die Fähigkeit, das Licht stark zu bündeln. Dadurch entsteht ein Strahl, der sehr schmal ist. Dieses Charakteristikum ermöglichte die Entwicklung von Laserscannern, da Objekte schrittweise mit dem Strahl abgetastet werden können. Außerdem ist somit eine Berechnung der sogenannten Objektreflektivität möglich, da angenommen werden kann, dass nahezu das gesamte Licht eines Strahls zum Objekt gelangt.

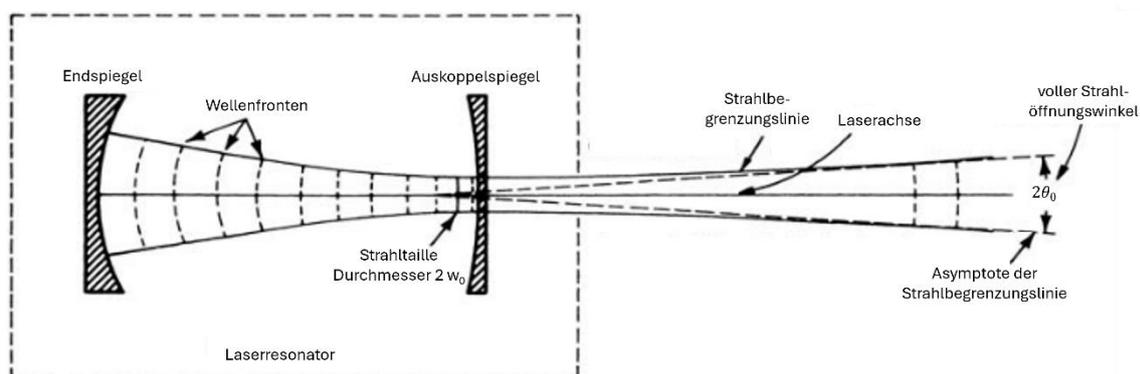


Abbildung 2.3: Strahldivergenz (nach [2])

Abbildung 2.3 zeigt, dass der Strahl in der Praxis eine gewisse **Divergenz** aufweist. Infolgedessen dehnt sich der Strahl mit zunehmendem Abstand zum Auskoppelspiegel in Querrichtung aus. Denn Licht wird gebeugt, wenn es einen Spalt passiert. Quantitativ kann dieses Verhalten mit dem Strahlöffnungswinkel $2\theta_0$ beschrieben werden, welcher sich zwischen der jeweiligen Asymptote der Strahlbegrenzungslinien befindet. Diese beiden Geraden schneiden sich im Bereich der Strahltaille. Der stark reflektierende Endspiegel ist konkav geformt, sodass sich unmittelbar vor dem Auskoppelspiegel die Strahltaille mit dem Durchmesser $2w_0$ ausbildet. In diesem Bereich ist der Strahl am schmalsten und weist die größte Intensität im Laserstrahl auf. Die maximale Intensität wird mit I_0 bezeichnet und gilt auf der gesamten Laserachse. Zum Rand hin nimmt die Intensität ab, bis sie schließlich an der Strahlbegrenzungslinie ihr Minimum erreicht. Die Intensität kann am Rand mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$I = \frac{I_0}{e^2} \quad (2.1)$$

Die Eulerzahl e geht im Nenner quadratisch ein. Daraus folgt, dass die Intensität am Strahlrand mit dem konstanten Verhältnis $\frac{1}{e^2} \approx 13,5\%$ bezogen auf die maximale Intensität beschrieben werden kann. Daher bleibt die Intensität eines Laserstrahls in der Theorie auch mit steigender Entfernung konstant. Neben der Intensität lässt sich auch der halbe Strahlöffnungswinkel θ_0 mathematisch beschreiben. Für diesen gilt:

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi * w_0} \quad (2.2)$$

Aus der Gleichung 2.2 geht hervor, dass kurzwellige Laser mit einer großen Strahltaile die kleinsten Öffnungswinkel besitzen. Die mathematische Beziehung gilt auch weiterhin, wenn der Laserstrahl ein optisches Bauelement passiert. Das Laserlicht wird zwar beispielsweise an einer konvexen Linse gebrochen, doch hinter dem Brennpunkt weitet sich der Strahl wieder mit dem ursprünglichen Öffnungswinkel $2\theta_0$ auf. [2]

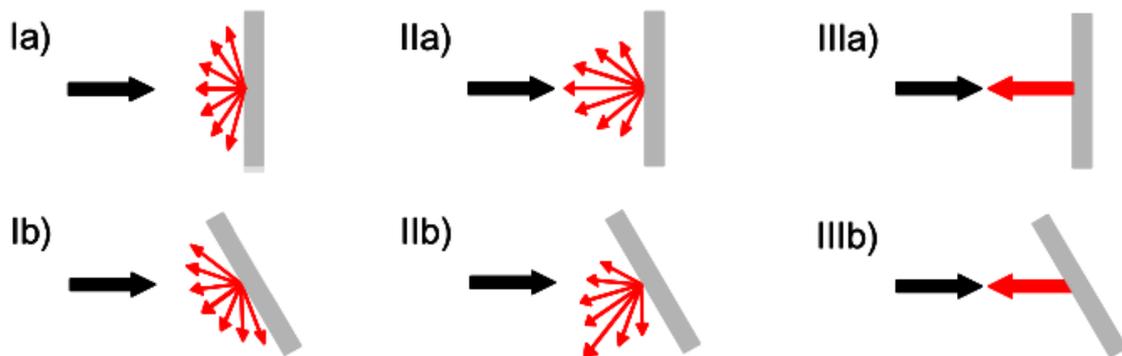


Abbildung 2.4: Streuung und Reflexion an Oberflächen [3]

Abbildung 2.4 verdeutlicht die **Streuung** eines reflektierten Laserstrahls. Diese hängt von mehreren Faktoren ab. Trifft das Lichtbündel auf eine raue Oberfläche, wird dieses nach der Reflexion diffus gestreut (siehe Abb. 2.4, Ia) und Ib)). Der Grund dafür sind die Unebenheiten, die in verschiedenen Winkeln zum auftreffenden Strahl stehen. Dieses Streuverhalten kann beispielsweise an Asphalt als rauen Fahrbahnbelag beobachtet werden.

Die meisten Objekte im gewöhnlichen Fahrzeugumfeld sind jedoch glatt, weshalb der totalreflektierende Anteil überwiegt (siehe Abb. 2.4, IIa) und IIb)). Das bedeutet, dass für die Mehrheit des gespiegelten Lichtes das Reflexionsgesetz gilt. Dieses besagt, dass der einfallende und ausfallende Strahl in einer Ebene liegt und der Ein- und Ausfallswinkel gleich groß sind. Die **Reflexion** an solchen Gegenständen geht mit einer geringeren Streuung im Vergleich zu rauen Oberflächen einher. Das Fahrzeugexterieur ist zum Großteil von glatten

Oberflächen gekennzeichnet. Daher sind für Fahrzeuge höhere Reflektivitätswerte im Vergleich zu rauen Oberflächen zu erwarten.

Trifft das Laserlicht auf einen Retroreflektor, wird an der Oberfläche in erster Näherung keine Streuung initiiert (siehe Abb. 2.4, IIIa) und IIIb). Neben Fahrzeugkennzeichen besitzen Verkehrsschilder und Fahrzeugrückleuchten solche Eigenschaften. Sie sind mit mikroskopisch kleinen spiegelnden Elementen versehen. Diese katadioptrischen Bestandteile senden unabhängig vom Anleuchtwinkel das gesamte eintreffende Licht zurück zur Strahlungsquelle. Die reflektierte Energie ist demnach nicht nur höher als in den anderen beiden Fällen, sondern auch nahezu konstant für einen sehr großen Bereich des Einfallswinkels. [3]

2.3 Laserscanner

Die beschriebenen Charakteristika des vorangegangenen Abschnittes werden in Laserscannern genutzt, um das Umfeld mit hoher Präzision zu vermessen.

2.3.1 Messung der Objektentfernung

Die dreidimensionale optische Messmethode ist unter der Bezeichnung „LiDAR“ (engl. *Light Detection And Ranging*) bekannt. Hierbei emittiert der Laser wiederholt in sehr kleinen Zeitintervallen Laserlicht. Dieses wird an einem Objekt gebrochen, gestreut und reflektiert, sodass ein Teil der Strahlung zurück zum LiDAR gelangt.

Laserscanner werden hinsichtlich ihres Messverfahrens in die zwei Klassen Pulslaserscanner und Phasenlaserscanner geteilt. Ferner ist eine Kombination aus beiden Methoden möglich.

Bei der Entfernungsmessung mithilfe von **Phasenlaserscannern** wird die Phasenverschiebung zwischen dem gesendeten und dem empfangenen Signal untersucht. Das Laserlicht weist hierbei verschiedene Wellenlängen auf. Mit zunehmender Entfernung verändern sich deren Phasen. Diese Methode ermöglicht eine hochpräzise Vermessung der nahen Umgebung bis rund *50 m*.

Die **Pulslaserscanner** funktionieren nach dem Prinzip der Pulslichtlaufzeitmessung. Es wird die Zeitspanne Δt gemessen, in der ein ausgesendeter Lichtpuls zum Reflektor und wieder zurück zum LiDAR gelangt. Die Objektentfernung d wird durch Anwendung des Geschwindigkeit-Zeit-Gesetzes berechnet:

$$d = \frac{1}{2} * c_{Licht} * \Delta t \quad (2.3)$$

Da die Lichtgeschwindigkeit c_{Licht} innerhalb eines Mediums als konstant angenommen werden kann, sind der Abstand d und die Zeitdifferenz Δt zwischen Aussenden und Empfangen

des Laserpulses direkt proportional zueinander. Als Messgrößen wird der Objektabstand, die Ausrichtung der Ablenkoptik und die Intensität des reflektierten Lichts aufgenommen. Aus dem Objektabstand und der momentanen Stellung der Ablenkmechanik kann auf die Position des reflektierenden Gegenstandes geschlossen werden.

Die Photodioden befinden sich im Inneren des Laserscanners und empfangen das reflektierte Licht. Die Polarkoordinaten werden in einem Prozessor in kartesische Koordinaten (x , y , z) umgewandelt. Durch das wiederholte Aussenden eines Lichtpulses mit großer Taktzahl wird folglich ein Abbild der Umgebung erzeugt, welches als sogenannte Punktwolke vorliegt. Diese ist für das menschliche Auge zwar vorerst schwerer zu interpretieren als beispielsweise ein Kamerabild, jedoch können Klassifikationen von Objekten anhand eines Verarbeitungsalgorithmus vom Computer mit höherer Präzision berechnet werden, als es bei der Bildverarbeitung von Kameras der Fall ist. Das liegt zum einen daran, dass die Position des Objektes bereits als Messgröße in Form von Koordinaten vorliegt und zum anderen sind Messergebnisse von Laserscannern weniger anfällig auf Außeneinflüsse wie Lichtverhältnisse und Witterung. [3]

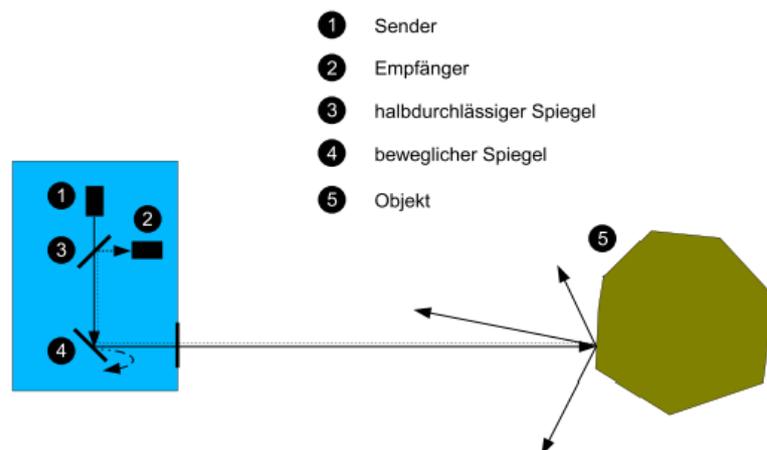


Abbildung 2.5: vereinfachter Aufbau und Strahlenverlauf eines Laserscanners [4]

Abbildung 2.5 stellt einen vereinfachten Aufbau eines Laserscanners dar. Der Sender (1) wird für die Erzeugung des gerichteten Laserlichtes benötigt, welches durch einen semipermeablen Spiegel (3) verläuft. Dieser halbtransparente Reflektor ist nicht mit dem Auskoppelspiegel des Lasers gleichzusetzen. Der Auskoppelspiegel befindet sich im Resonator und wird für die Erzeugung des monochromatischen, kohärenten Lichtes benötigt. Die Strahlung trifft schließlich auf einen beweglichen Spiegel (4). Bevor der Laserstrahl aus dem Scanner austritt, wird das abgelenkte Strahlenbündel in der Regel nochmals komprimiert, um der Strahlbeugung entgegenzuwirken. Am Zielobjekt wird die Strahlung anschließend je nach Oberflächenbeschaffenheit gestreut und reflektiert und gelangt zurück auf die bewegliche Reflexionsfläche (4). Der halbtransparente Spiegel (3) hat die Eigenschaft, dass er das Licht von dieser Seite vollständig in Richtung des Empfängers (2)

reflektiert. Der bewegliche Spiegel, der je nach Bauform auch beispielsweise ein 360° -rotierendes Prisma (siehe Ouster OS1) sein kann, bestimmt die Messgenauigkeit des Laserscanners maßgeblich. Denn dessen Winkelauflösung bestimmt die mögliche Anzahl an Messpunkten, die in jedem vollständigen Zyklus auf einer Oberfläche erzeugt werden. Mit einem vollständigen Zyklus ist bei 360° -Rotationslaser eine volle Umdrehung gemeint. Es gibt aber auch Lasertypen, die einen kleineren Winkelbereich von beispielsweise 120° (Leishen LS128) realisieren. Dadurch wird zwar ein kleinerer Teil der Umgebung wahrgenommen, jedoch resultiert aus dem kleineren Sichtfeld bei gleicher Anzahl an Laserstrahlen eines Taktes eine höhere Punktdichte. [4]

In der Verarbeitungselektronik sind Zeitmesser (z.B. TDC – Time to Digital Converter) verbaut, die es ermöglichen die Laufzeit sehr präzise zu erfassen. Mit der Gleichung 2.3 ergibt sich für ein 15 m entferntes Objekt folgende Laufzeit Δt :

$$\Delta t = \frac{2 * r}{c_{\text{Licht}}} = \frac{2 * 15\text{ m}}{299.792.458 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 10^{-7}\text{ s}$$

Die Beispielrechnung zeigt, in welcher Größenordnung die Zeitspanne liegt. Um dennoch ein exaktes Messergebnis zu generieren, werden Verzögerungsglieder in einer Reihe angeordnet. Sie sind Teil des digitalen Zeitmessers und ermöglichen aufgrund ihres Übertragungsverhaltens eine exakte Messung der Punktentfernung und eine Auflösung im Bereich von Picosekunden (10^{-12} s).

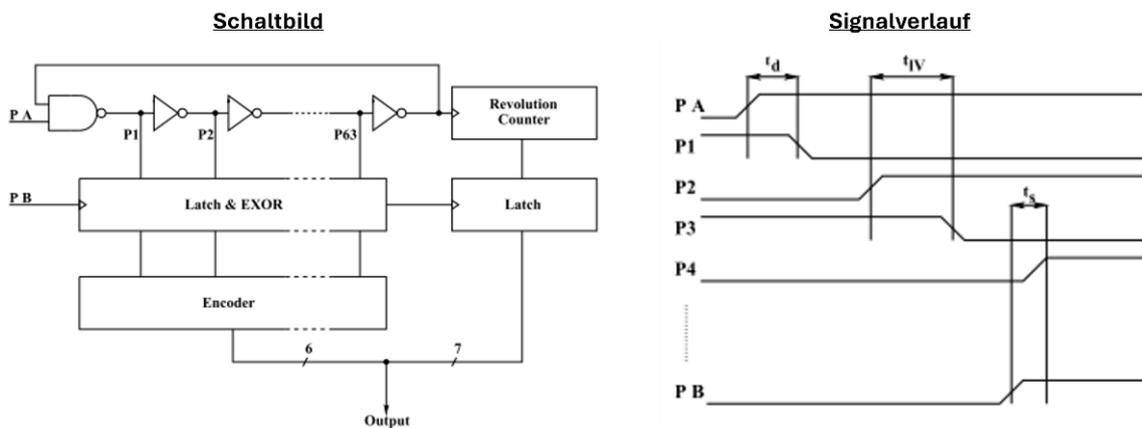


Abbildung 2.6: Time to Digital Converter [4]

In der Abbildung 2.6 ist der Schaltplan des TDC sowie der Signalverlauf der Verzögerungsglieder P1, P2, P3 und P4 dargestellt. Das Startsignal PA wird initiiert, sobald der Laserpuls den LiDAR verlässt. Anschließend fließt der elektrische Strom durch die Verzögerungsglieder P1 bis P63 (Schaltbild). Nach jedem Durchlauf wird der Zähler (engl. *Revolution Counter*) invertiert. Der Signalfluss wird zum Anfangsglied PA zurückgeleitet. Dieser Prozess wird so lange weitergeführt, bis der reflektierte Laserpuls am Empfänger des Laserscanners ankommt. Durch das Empfangssignal PB werden die Werte der Latches in

einen numerischen Wert umgewandelt. Latches sind elektronische Bauelemente, die binäre Informationen speichern. Im Signalverlauf sind die Zustände der Latches dargestellt. Diese Informationen werden mit dem Ausgangswert des Zählers ausgewertet. Durch die äquivalente Signallaufzeit durch jedes Verzögerungsglied ist der finale Ausgangswert proportional zur Laufzeit des Laserpulses. [4]

2.3.2 Messung der Bestrahlungsstärke

Da die Reflektivität im Rahmen dieser Diplomarbeit in den entwickelten Algorithmen verwendet sowie anhand von Messungen analysiert wird, ist es unabdingbar über die Entstehung dieser Größe informiert zu sein. Wie bereits im Abschnitt „Eigenschaften des Laserlichtes“ (Abschnitt 2.2) beschrieben wurde, ist die Oberfläche des reflektierenden Objektes maßgeblich für die zurückgesendete Energie verantwortlich.

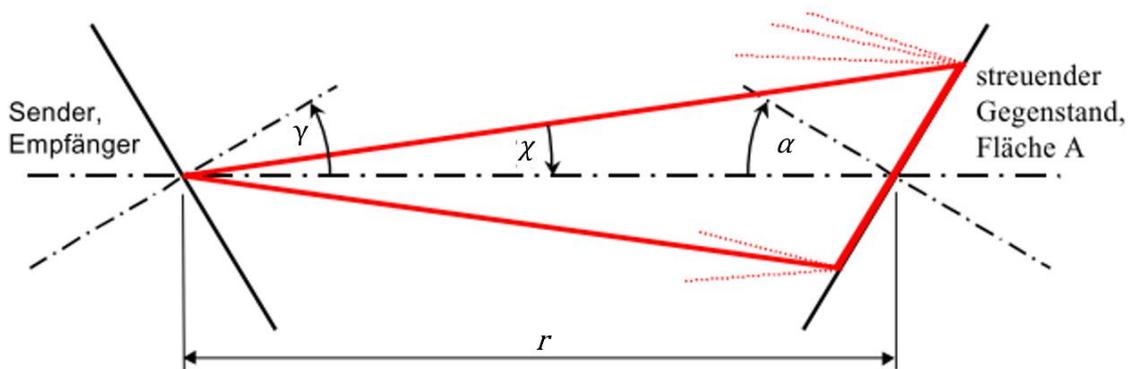


Abbildung 2.7: Reflexionsdreieck der Laserstrahlen bei Vermessung eines Objekts (nach [3])

Abbildung 2.7 zeigt vereinfacht eine mögliche Vermessung eines Kennzeichens in der Entfernung r . Die Laserstrahlen werden vom Sender je nach Sensoröffnungswinkel 2χ auf eine Fläche A des Objekts gerichtet. Der Sensoröffnungswinkel 2χ beschreibt den Winkelbereich, in dem der LiDAR Laserstrahlen emittiert. Aus der Angabe des horizontalen und vertikalen Sensoröffnungswinkels kann auf den Sichtbereich des Laserscanners geschlossen werden. Diese Größe darf nicht mit dem Strahlöffnungswinkel $2\theta_0$, welcher die Divergenz eines Laserstrahls beschreibt, verwechselt werden.

Aus der Abbildung 2.7 ist zu entnehmen, dass der Reflektor um den Einfallswinkel α zur Mittelachse geneigt ist. Die beleuchtete Fläche sollte vollständig innerhalb des Zielobjektes liegen, sodass die gesamte Energie zurückgeworfen werden kann. Die Bestrahlungsstärke E definiert die flächenbezogene reflektierte Energie und kann mit folgender Formel beschrieben werden:

$$E = R * \frac{\phi_0}{\pi * d^2} * \cos \alpha \quad (2.4)$$

Die Bestrahlungsstärke E ist direkt proportional zum Reflexionsvermögen R des Gegenstandes und zur Sendeleistung ϕ_0 des Lasers. Ferner ist aus der Formel 2.4 zu entnehmen, dass der Abstand einen großen Einfluss auf die Bestrahlungsenergie hat. Dies scheint ein Widerspruch zur Gleichung 2.1 zu sein, mit der bewiesen wurde, dass die Intensitätsverteilung im Laserstrahl unabhängig von der Entfernung ist. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass sich die Gleichung 2.4 auf den reflektierten Strahl bezieht. Der Entfernungseinfluss kann verdeutlicht werden, wenn die diffuse reflektierte Strahlung betrachtet wird. Von diesem reflektierten Strahlungsanteil gelangt umso mehr zu den Photodioden, je geringer der Abstand zwischen dem Scanner und dem Gegenstand ist. Dass die Intensität des einfallenden Strahls konstant für beliebige Entfernungen ist (siehe Gleichung 2.1), hat demnach für die Bestrahlungsstärke des zurückgeworfenen Strahls keine Bedeutung. Des Weiteren ist die Bestrahlungsstärke sowohl von der Divergenz des Laserpulses 2χ als auch vom Einfallswinkel α am Reflektor unabhängig.

Die Gleichung 2.4 gilt für beliebige Oberflächen. Handelt es sich um einen Retroreflektor, gilt folgende Besonderheit:

$$E = c * \frac{\phi_0}{\pi * r^2} \quad (2.5)$$

Der Grund, warum die Einfallswinkel bei diesen Reflektoren keinen Einfluss auf die zurückgesendete Energie haben, wurde bereits anhand der Reflexion von Laserstrahlen erklärt (siehe Abbildung 2.4).

Neben der Bestrahlungsstärke existieren weitere optische Parameter, mit denen die Laserstrahlen beschrieben werden können. Hierbei ist es üblich, zwischen radiometrischen und photometrischen Größen zu unterscheiden. Letztere werden verwendet, wenn die Erscheinung in Bezug auf das menschliche Auge quantifiziert werden soll. Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit werden jedoch die radiometrischen Größen genutzt, um die elektromagnetischen Laserwellen zu untersuchen.

Tabelle 2.1: Vergleich radiometrischer und photometrischer Größen (nach [5])

	radiometrische Größe	Symbol Einheit	Formel	Symbol Einheit	photometrische Größe
strahlungs- feld bezogen	Strahlungsfluss	Φ W		Φ_1 lm	Lichtstrom
	Strahlungsenergie	Q J	$\int \Phi dt$	Q_1 $lm*s$	Lichtmenge
senderbe- zogen	Strahlstärke	I $\frac{W}{sr}$	$\frac{d\Phi}{d\Omega}$	I_1 cd	Lichtstärke
	Strahldichte	L $\frac{W}{m^2*sr}$	$\frac{dI}{dA \cos\theta}$	L_1 $\frac{cd}{m^2}$	Leuchtdichte
empfängerbe- zogen	Bestrahlungsstärke	E $\frac{W}{m^2}$	$\frac{d\Phi}{dA}$	E_1 lx	Beleuchtungsstärke
	Bestrahlung	H $\frac{J}{m^2}$	$\int E dt$	H_1 $lx*s$	Belichtung
	physikalisch			physiologisch	

Die Tabelle 2.1 verweist für jede radiometrische auf die entsprechende photometrische Größe. Die Einheit Steradian (sr) steht für den Raumwinkel. Obwohl oftmals in der Fachliteratur von der Messung der Intensität berichtet wird, erfassen die Photodioden des Empfängers im Laserscanner faktisch den Strahlungsfluss Φ (siehe Tabelle 2.1). Für eine verlustfreie Reflexion ist dieser gleich der Sendeleistung des Lasers Φ_0 . Mithilfe der bekannten Fläche A der Photodioden, kann die Bestrahlungsstärke E ermittelt werden. Die Intensität beschreibt allgemein die flächenbezogene Leistung. Beide Größen besitzen die Einheit $\frac{W}{m^2}$. Die Bestrahlungsstärke beschreibt speziell die Intensität empfangener elektromagnetischer Wellen. Im Folgenden werden daher die Begriffe Reemissionswert, Bestrahlungsstärke und Intensität als Synonym verwendet.

Die Bestrahlungsstärke wird schließlich anhand von Referenzwerten in eine Prozentzahl zwischen 0 und 100 % umgewandelt. Diese Referenzwerte sind unbekannt und variieren je nach Laserscanner. Der Prozentwert wird je nach Sensor in eine 1-Byte- beziehungsweise 2-Byte- Variable gespeichert, sodass der Reemissionswert im Bereich $0 \leq E \leq 255 (= 2^8)$ beziehungsweise $0 \leq E \leq 65536 (2^{16})$ liegt. In den folgenden Betrachtungen wird auf die

Einheit der gemessenen Bestrahlungsstärke verzichtet. Eine Angabe in Prozent ist nicht sinnvoll, da abgeleitete Größen, wie zum Beispiel die Standardabweichung die gleiche Einheit tragen. Eine Prozentangabe solcher Werte erschwert die Auswertung. Folglich werden die Ergebnisse im Bereich von $0 \leq E \leq 255$ angegeben.

2.3.3 Störeinflüsse

Um eine Verschmutzungs- und Witterungsabschätzung entwickeln zu können, wird vorerst untersucht, welchen Einfluss die Störfaktoren auf das Messprinzip nehmen.

Zum einen wird das Licht von der **Witterung** beeinflusst. Je nach Wellenlänge der emittierten Laserstrahlen vermindert sich die Reichweite bei starken Niederschlägen in Form von Regen, Hagel oder Schnee. Hierbei wird der Laserstrahl an Wassertropfen beziehungsweise Eiskristallen diffus reflektiert oder gebrochen.

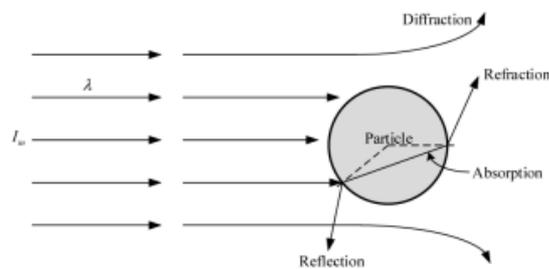


Abbildung 2.8: Einfluss eines Schmutzpartikels auf Lichtausbreitung [6]

Abbildung 2.8 veranschaulicht die Kollision der Laserstrahlung mit einem beliebigen Partikel. Die exakten Brechungswinkel und Reflexionseigenschaften hängen von dem Stoff, der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Form des Fremdkörpers ab. Wassertropfen sind beispielsweise lichtdurchlässig, während Eiskristalle den Großteil der Strahlung reflektieren.

Bilden sich **Ablagerungen** („Verschmutzung“) wie Schnee, Wasser oder Schmutz auf der Scheibe des Laserscanners, wird die tatsächliche Sendeleistung $\Phi_{0,tats.}$ verringert. Dabei wird später anhand von Messungen untersucht, wie groß der Einfluss auf den Reemissionswert ist.

Wichtig für die Störungsuntersuchung der Witterungs- und Verschmutzungserkennung ist, dass fremde Laserstrahlung bei allen drei Laserscannern herausgefiltert wird und daher nicht das Messergebnis beeinflussen kann.

2.4 Verwendete Umfeldsensorik

Tabelle 2.2: technische Daten der drei relevanten Laserscanner (nach [7], [8], [9], [10] und [11])

	Laserscanner		
	Ouster OS1	Leishen LS128S2	Livox Horizon
Wellenlänge λ [nm]	865	1550	905
Strahlöffnungswinkel $2\theta_0$ [°]	0,18	0,1 bis 0,2	0,03
max. Anzahl Scanpunkte je Sekunde	5.242.800	1.480.000	240.000
Scanrate f_{scan} [Hz]	10 bzw. 20	20 Hz	
Schutzklasse nach IEC 60529	IP68	IP6K9K	IP67
Erfassungsbereich x (bei 10% Reflektivität)	0,5 m bis 90 m	1,5 m bis 180 m	3,0 m bis 80 m
Nahbereich (keine Vermessung möglich), x -Dimension	0 m bis 0,5 m	0 m bis 1,5 m	0 m bis 3,0 m
horizontaler Sensoröffnungswinkel χ_{hor} [°]	360	120	81,7
vertikaler Sensoröffnungswinkel χ_{vert} [°]	45	25	25,1
horizontale Auflösung $\Delta\chi_{hor}$ [°]	0,70; 0,35 bzw. 0,18	0,20	
vertikale Auflösung $\Delta\chi_{vert}$ [°]	0,70	0,20	

Die Spezifikationen der verwendeten Laserscanner sind der Tabelle 2.2 zu entnehmen. Daraus geht hervor, dass alle Sensoren Laserlicht im Infrarotbereich ($780 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1400 \text{ nm}$) emittieren. Des Weiteren sind sie staub- (erste Ziffer: „6“ in IP-Schutzklasse) und wasserdicht (zweite Ziffer: „7“ bis „9“ in IP-Schutzklasse). Somit ist es möglich, diese Sensoren ohne Abdeckung außen am Fahrzeug zu montieren, sodass sie direktem Witterungs- und Verschmutzungseinfluss ausgesetzt sind. Für die Festlegung eines Beobachtungsgebiets ist zu beachten, dass die Laserscanner im Nahbereich aufgrund der Messmethodik der Lichtlaufzeitmessung (siehe Abschnitt 2.3.1) kein Objekt vermessen können. Die maximale Entfernung gilt für Objekte mit einer Reflektivität von $R = 10 \%$. Da Kennzeichen jedoch höhere Reflektivitäten aufweisen, wäre eine Erkennung der Retroreflektoren laut Herstellerangaben auch in größerer Entfernung möglich.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Funktionsweisen der Sensoren kurz erläutert.

Der **Ouster OS1** ist ein 360° -Rotationsscanner, welcher mit 64 Empfangskanälen (Photodioden) ausgestattet ist. Jeder Empfangskanal wird einer Ebene zugeordnet, sodass das Sichtfeld in 64 übereinander liegende, äquidistante Punktzeilen unterteilt wird. [7],[8]

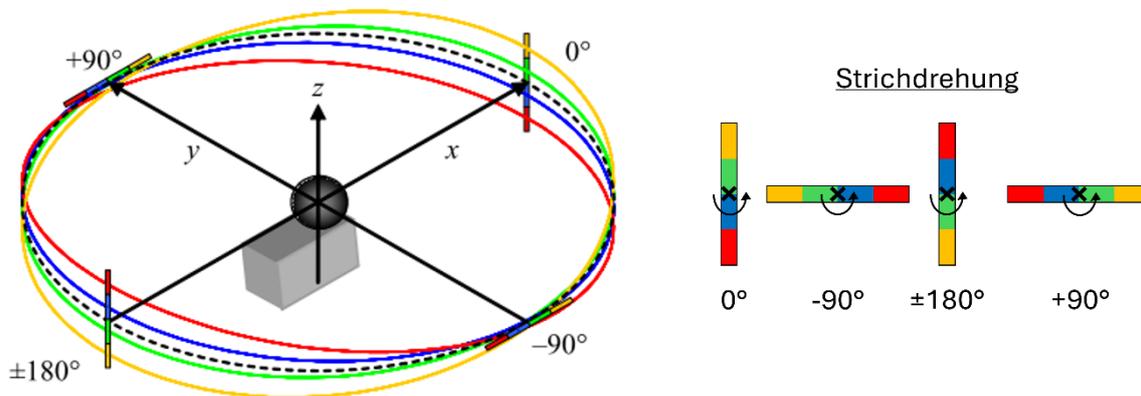


Abbildung 4: Funktionsprinzip Rotationlaser (nach [3])

In Abbildung 4 ist ersichtlich, dass der Laser an jeder diskreten Stelle ein Abbild der Umgebung mithilfe übereinanderliegender Punkte, welche einen Strich bilden, erstellt. Da der Sensor in der Abbildung vereinfachend vier Empfangskanäle besitzt, ist der Strich in vier Bereiche geteilt, sodass bei der Rotation der Laseroptik mehrere Ebenen zu sehen sind. Dabei ist eine sogenannte „Strichdrehung“ erkennbar. Das bedeutet, dass sich die relative Lage der Ebenen zueinander mit der Drehung des Prismas ändert. Beispielsweise liegt die gelb markierte Linie bei 0° an oberster Stelle, während sie bei 180° am weitesten unten liegt. Je mehr Ebenen beziehungsweise Empfangskanäle ein Laserscanner hat, desto besser ist zum Beispiel die Formgenauigkeit der Objekte in der erzeugten Punktwolke. Dieser Vorteil gilt allerdings nicht für den Bereich um -90° und $+90^\circ$, da dort der Abstand der Ebenen gegen null strebt. Es wird faktisch nur in einer Ebene gemessen. Dieser Extremfall wird in der Praxis durch eine versetzte Anordnung der Photodioden verhindert. Trotz der Abweichung von der Anordnung in einer Linie (Strich) gilt die Besonderheit für den seitlichen Sichtbereich, dass sich die Punktzeilenabstände stark verringern.

Da die Objektdetektion in kartesischen Koordinaten durchgeführt werden soll, muss das Rechenwerk schließlich die Polarkoordinaten der Messpunkte umwandeln. [3]

Für die Algorithmenentwicklung wird ein weiterer Mehrzeilenscanner verwendet. Der **Leishen LS128S2** ist ein Hybrid-Festkörper-Laserscanner mit 128 Empfangskanälen. Die Strichdrehung ist für diesen Sensor von geringerer Bedeutung, da der horizontale Sensoröffnungswinkel nur $\chi_{hor} = 120^\circ$ beträgt.

Die Funktionsweise des **Livox Horizon** unterscheidet sich maßgeblich von den beiden Mehrzeilenscannern. Während diese die Umgebung in diskreten Wiederholungen scannen,

verfügt der Livox Horizon über eine nicht-repetitive Scantechnologie. Hierbei rotieren zwei keilförmige Linsen, die als Risley-Optiken bekannt sind, koaxial in entgegengesetzter Richtung. Es entsteht ein schleifenförmiges geschlossenes Scanmuster, mit dem kontinuierlich das gesamte Sichtfeld gescannt werden kann. [10],

[11], [12]

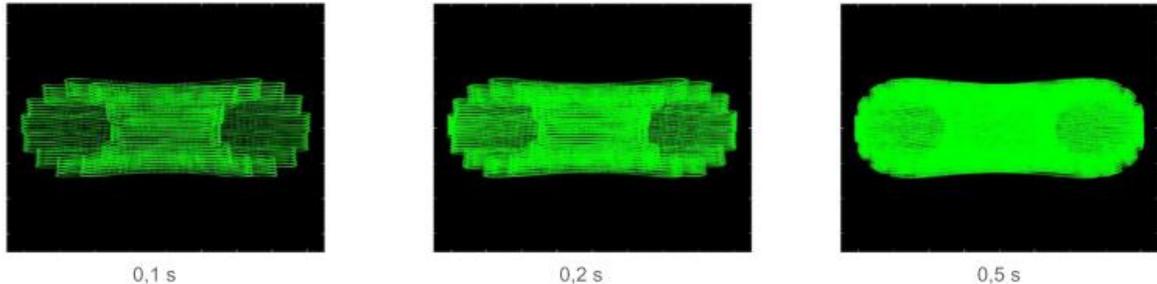


Abbildung 2.9: Kumulierung des Scanmusters [10]

In Abbildung 2.9 ist zu sehen, wie die Punktdichte durch einen längeren Betrachtungszeitraum zunimmt. In der Sichtfeldmitte ist die Punktdichte des Scanners am höchsten, da sich dort die meisten Schleifen überlagern. Das Strecken der Schleifen bewirkt, dass auch die Ränder des Sichtfeldes gescannt werden. Durch das Anhäufen neuer Punkte wird das Abbild der Umgebung stetig genauer, sodass nach einer halben Sekunde fast das gesamte Sichtfeld mit Messpunkten gescannt wurde. Diese Zeitabhängigkeit der Sichtfeld-Abdeckung ist in folgender Grafik veranschaulicht.

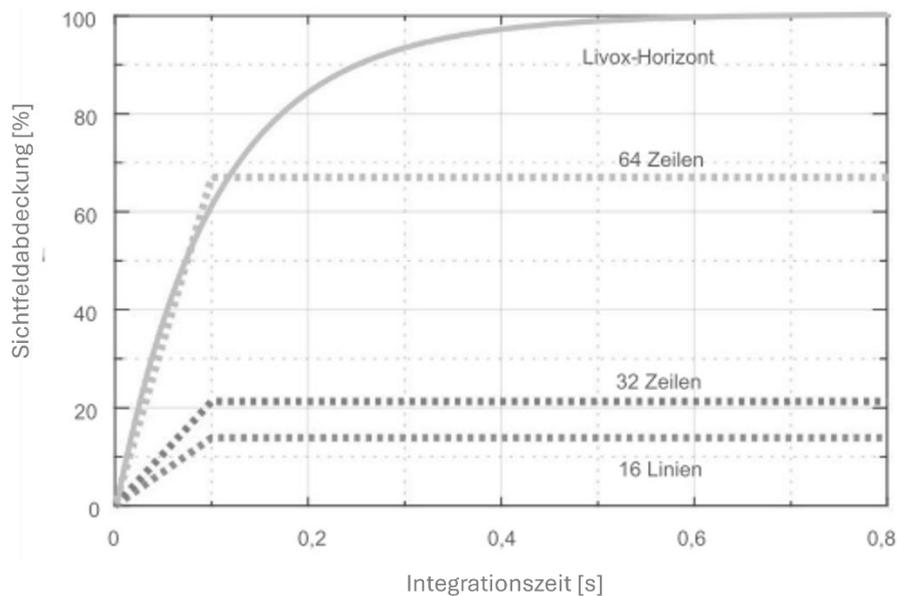


Abbildung 2.10: Sichtfeld-Abdeckung in Abhängigkeit der Integrationszeit [10]

Das Diagramm in Abbildung 2.10 zeigt den Vorteil des kontinuierlichen Scanverfahrens gegenüber herkömmlichen Mehrzeilenscannern mit ähnlich großen Sichtfeldern. Ein 64-Ebenen-Scanner, wie zum Beispiel der Ouster OS1, kann auch nach langen Integrationszeiträumen von mehr als 0,1 s nicht das gesamte Sichtfeld vermessen, da zwischen den

Ebenen weiterhin Leerräume existieren. Durch die variable Sensor-Optik des Livox Horizon können die Scanschleifen so verschoben, gestreckt und gestaucht werden, dass durch Kumulation mehrerer Schleifen nach circa $t = 0,8$ s jeder Bereich des Sichtfelds vermessen wurde. [10]

2.5 Fahrzeugkennzeichen

Aufgrund der Komplexität der gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich Kennzeichen an Kraftfahrzeugen werden im Folgenden nur ausgewählte Abschnitte aufgeführt, die für den Algorithmus der Objekterkennung von Bedeutung sind.

2.5.1 Montage und Beschriftung

Die Beschriftung des Kennzeichens besteht aus einer Zeichenkette, die den Verwaltungsbezirk und eine fahrzeugspezifische Kennnummer beinhaltet (§ 9 Fahrzeugzulassungsverordnung). Diese Beschriftung ist in schwarz auf weißem Untergrund für gewöhnliche Kennzeichen aufzubringen. Zudem ist es nicht zulässig, dass die Sichtbarkeit durch Schmutz oder Abdeckungen beeinflusst wird. Das bedeutet, dass zu jedem detektierten Fahrzeug, welches längs zur Laserstrahlrichtung steht, Kennzeichen aufzufinden sind. Nummernschilder müssen der DIN 74069 entsprechen, die später erläutert wird. Neben der Beschriftung werden eine Stempelplakette und ein DIN-Prüfzeichen aufgebracht, die ebenfalls keine retroreflektierenden Eigenschaften aufweisen. Die Schilder sind an der Vorder- und Rückseite fest am Fahrzeug zu montieren. Eine Ausnahme bilden Anhänger und Krafträder, die ausschließlich am Heck gekennzeichnet werden müssen. Die hinteren Kennzeichen müssen bei allen Fahrzeugen beleuchtet sein. Die Lichtquellen sind so schwach, dass keine Beeinflussung hinsichtlich der Lasermessung zu erwarten ist. Das hintere Kennzeichen darf maximal 30° gegenüber der Fahrzeugvertikalachse geneigt sein. Dabei muss der untere Rand wenigstens 200 mm über der Fahrbahn liegen. Ist die Bodenfreiheit des Fahrzeugs größer als 200 mm , ist der Mindestwert für den unteren Kennzeichenrand gleich der Bodenfreiheit. Daraus geht hervor, dass Nummernschilder nicht über die Fahrzeugkontur hinausragen dürfen. Einschränkungen hinsichtlich der Position am Fahrzeug existieren nicht. Hier kann es bei der Algorithmusentwicklung möglicherweise zweckmäßig sein, sich an üblichen Positionen von Kennzeichenhaltern zu orientieren. Diese sind bei Pkws häufig etwas unterhalb der Heckklappenmitte angebracht. Kastenwagen tragen aufgrund der Türkonstruktionen das hintere Schild auf ähnlicher relativer Höhe, allerdings von der Mitte in Fahrzeuguerrichtung versetzt. Das hintere Nummernschild von Lastkraftwagen wird in der Regel in einer Höhe von $200\text{ bis }500\text{ mm}$ an dem Heck-Unterfahrschutz mittig montiert. Damit der Fahrzeughalter einem Zulassungsstaat zugeordnet werden kann, werden sogenannte Unterscheidungszeichen aufgedruckt. Diese sind verschieden lang, aber so klein, dass keine Unterschiede in den Reflexionsei-

genschaften durch internationale Abweichungen zu erwarten sind. Dieser blaue Bereich des Kennzeichens ist ebenso mit einer Retroreflexfolie beklebt. Allerdings ist das Reflexionsvermögen R kleiner als im weißen Bereich der Reflexfolie (§ 12 Fahrzeugzulassungsverordnung).

2.5.2 Abmessungen

Amtliche deutsche Fahrzeug-Kennzeichen werden nach DIN 74069:2022 hergestellt und am Fahrzeug oder Anhänger angebracht. Sie bestehen in den meisten Fällen aus einer Aluminiumlegierung und weisen eine Nenndicke von 1 mm auf. Andere Werkstoffe können genutzt werden, sofern ähnliche Oberflächenbeschaffenheiten erzielt werden. Grundsätzlich wird zwischen einzeiligen und mehrzeiligen Kennzeichen unterschieden.

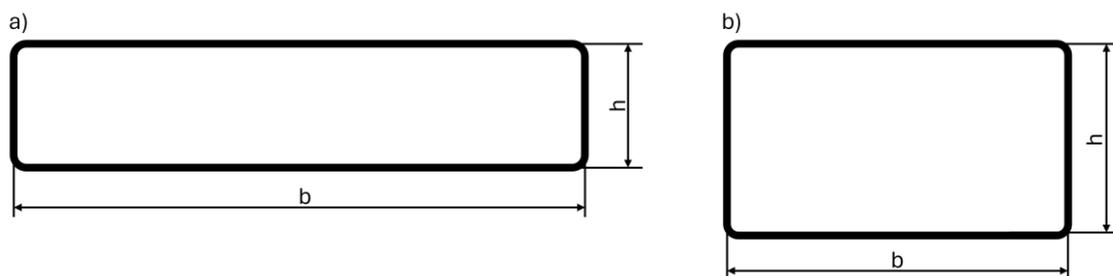


Abbildung 2.11: mögliche Kennzeichenformate; links: einzeiliges Kennzeichen, rechts: zweizeiliges Kennzeichen [13]

Die zulässigen Abmessungen sind der nachstehenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 2.3: Kombinationsmöglichkeiten der Kennzeichenabmessungen

Kennzeichenschild	Höhe	Höhe	Breite	Breite
	h_{\min} [mm]	h_{\max} [mm]	b_{\min} [mm]	h_{\max} [mm]
Motorradkennzeichen	200 ± 2	201 ± 3	180 0/-2 bis 220 +2/0	181 0/-3 bis 221 +3/0
zweizeilig für zwei- und dreirädrige Kfz	200 ± 2	201 ± 3	280 +2/0	281 +3/0
zweizeilig	200 ± 2	201 ± 3	340 +2/0	341 +3/0
einzeilig	110 ± 2	111 ± 3	520 +2/0	521 +3/0
Gruppe 1: einzeilig	108	114	520	524
Gruppe 2: zweizeilig	198	204	178	344

In der Tabelle 2.3 sind in den beiden unteren Zeilen die gruppenspezifischen Extremwerte aufgeführt. Für die Filterung der LiDAR-Daten ist festzuhalten, dass Kennzeichen mindestens $h_{min} = 108 \text{ mm}$ und maximal $h_{max} = 204 \text{ mm}$ hoch sein dürfen. Die mögliche Breite erstreckt sich von $b_{min} = 178 \text{ mm}$ bis $b_{max} = 524 \text{ mm}$.

Neben den Abmessungen muss bei der Entwicklung des Algorithmus die Reflexionscharakteristik des Kennzeichens zwingend berücksichtigt werden. Das Blechschild besitzt eine retroreflektierende ebene Oberfläche, die ein besonders hohes Rückstrahlvermögen aufweisen soll, damit angestrahlte Fahrzeuge auch bei Dunkelheit gut erkennbar sind. Der Rand und die Beschriftung weichen von der ebenen Topologie ab. Des Weiteren dürfen die Hintergrund- und die Schriftfarbe keine Farbverläufe aufweisen. Das Gleiche gilt für den gewölbten Rand. Jede Farbe reflektiert einen definierten Bereich der Wellenlängen des Lichts. Da der Untergrund weiß gestaltet sein muss und den größten Anteil der Fläche eines Kennzeichens ausmacht, ist davon auszugehen, dass ab einer gewissen Entfernung des Zielobjektes keine Reflektivitätsunterschiede aufgrund verschiedener Schriftfarben entstehen. Die Schriftzeichen sind auf den Untergrund aufgeprägt, sodass sie keine retroreflektierenden Eigenschaften besitzen. Das Erscheinungsbild des Kennzeichens darf keine Abplatzungen, Risse, Blasen, Verfärbungen und keine Korrosion aufweisen. [13]

2.5.3 Reflexionseigenschaften

Laserlicht besteht aus elektromagnetischen Wellen, die mit radiometrischen Größen beschrieben werden. Hinsichtlich der Retroreflexfolien auf den Kennzeichen werden jedoch Mindestwerte vorgeschrieben, welche auf photometrischen Größen (siehe Tabelle 2.1) beruhen. Diese beziehen sich lediglich auf die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes. Da die Laserscanner jedoch Licht im nicht sichtbaren Infrarotbereich aussenden, kann es vorkommen, dass die Reflexionseigenschaften des Retroreflektors für Laserlicht von den Vorgabewerten abweichen. Dennoch soll mithilfe der folgenden Erläuterungen eine Abschätzung der zu erwartenden Intensitätswerte erzielt werden.

Der Rückstrahlwert R eines Nummernschildes wird durch Beleuchtung mit weißem Licht gemessen. Der photometrische Rückstrahlwert wird durch die Formel

$$R_1 = \frac{I_1}{E_1} \quad (2.6)$$

beschrieben. Die photometrischen Größen werden in dieser Arbeit mit dem Index 1 gekennzeichnet. Da aus genannten Gründen die absoluten photometrischen Vorgabewerte für infrarotes Laserlicht die Gültigkeit verlieren, sind daraus lediglich Relationen abzuleiten: Durch den Alterungsprozess, der durch Berührung mit Salz oder Kraftstoff sowie durch die Sonneneinstrahlung resultiert, verschlechtert sich das Reflexionsvermögen. Der Rückstrahlwert muss auch im verwitterten Zustand mindestens 20 % der ursprünglichen

Reflektivität des Neuzustandes betragen. Diese Angaben gelten für eine nahezu orthogonale Anleuchtung. Wird der Einfallswinkel von $0^\circ \leq |\alpha| \leq 5^\circ$ auf $|\alpha| = 30^\circ$ erhöht, darf sich der zustandsabhängige Mindestwert des spezifischen Rückstrahlwertes halbieren. Das bedeutet, dass die Reflektivität der Kennzeichen im schlechten Zustand bei schräger Anleuchtung mindestens 10 % des Wertes im Neuzustand betragen muss. Daraus geht hervor, dass es eine Korrelation zwischen der Reflektivität und dem Einfallswinkel gibt.

Die Norm DIN 67520:2013, welche die Mindestanforderungen an Reflexstoffen definiert, gilt ebenso für Verkehrszeichen. Es ist demnach davon auszugehen, dass Verkehrszeichen und Kennzeichen in einem ähnlichen Witterungs- beziehungsweise Alterungszustand eine ähnliche Reflektivität aufweisen. [14]

2.5.4 Aufbau üblicher Reflexfolien

Im Folgenden werden verschiedene Ausführungsformen von Reflexfolien vorgestellt. Hierbei gilt es zu überprüfen, ob diese anfällig auf Witterung sind oder ob es eventuell Unterschiede im Reflexionsvermögen gibt.

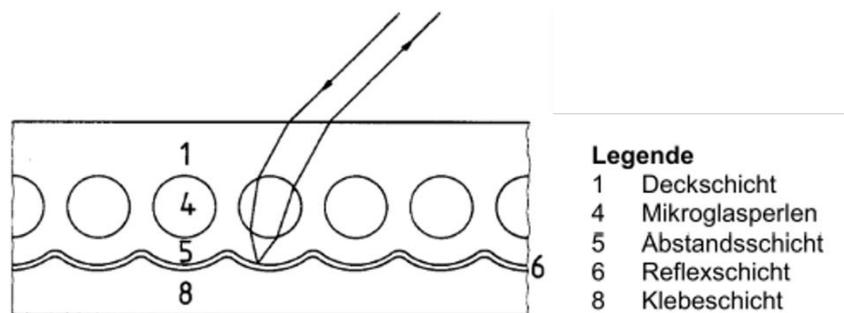


Abbildung 2.12: Reflexfolienaufbau mit eingebundenen Mikrogasperlen [14]

Abbildung 2.12 zeigt den schematischen Aufbau einer Reflexfolie, die mikroskopisch kleine Glaskugeln (4) einbindet. Diese befinden sich zwischen der Abstandsschicht (5, 1) und sind für die Brechung des Lichtes verantwortlich. Der einfallende Strahl wird bereits beim Eindringen in die Deckschicht umgelenkt. In den **eingebundenen Mikrogasperlen** werden die Lichtwellen zur Reflexschicht (6) abgelenkt. Diese Oberfläche weist Dellen auf, die an die Größe der Kugeln angepasst sind. Dadurch ist es möglich, dass die reflektierte Strahlung erneut durch die Glasperlen und schließlich parallel zum Eintrittsstrahl verläuft. Somit gelangt das Licht zurück zur Lichtquelle. Damit dieses Charakteristikum einer Retroreflexion auf Kennzeichen übertragen werden kann, wird die Folie mithilfe der Klebeschicht (8) auf der Kennzeichenplatte angebracht.

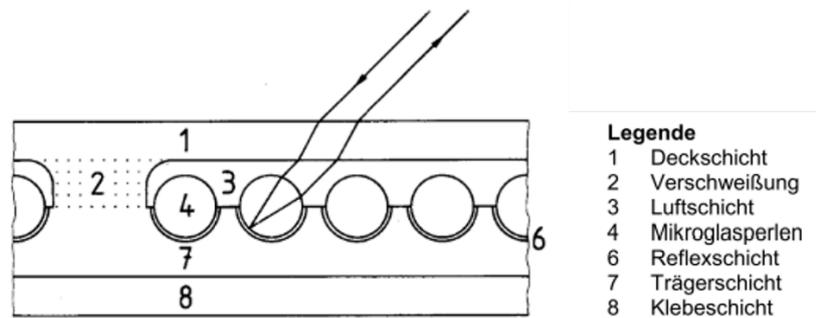


Abbildung 2.13: Reflexfolienaufbau mit eingekapselten Mikroglasperlen [14]

Anhand der Abbildung 2.13 wird die Variante mit **eingekapselten Mikroglasperlen** (4) verdeutlicht. Diese Brechkörper befinden sich im Unterschied zur Ausführungsform mit eingebundenen Glaskörpern direkt auf der Reflexschicht (6). In der Glaskugel erfolgt daher nur eine Strahlableitung an der oberen Seite. Die Anzahl der Brechungen im gesamten Querschnitt der Reflexfolie bleibt jedoch gleich, da mit der Luftschicht (3) ein weiterer Medienübergang existiert. Die Mikroglasperlen werden durch die Deck- und Trägerschicht (1, 7) sowie den Verschweißungen (2) zusammengehalten. Die Klebeschicht (8) sorgt dafür, dass die Folie an nahezu allen Materialien gut haftet. Charakteristisch für Retroreflexstoffe verlaufen Primär- und Reflexionsstrahl parallel zueinander.

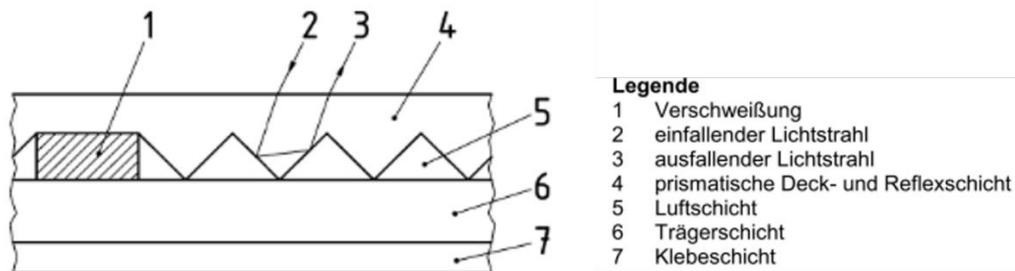


Abbildung 2.14: Reflexfolienaufbau mit mikroprismatischen Reflexkörpern [14]

Abbildung 2.14 stellt die Struktur der Reflexfolien mit **mikroprismatischen Optiken** (5) dar. Diese spitzzulaufenden Körper, welche nicht-metallisiert, teilmetallisiert oder metallisiert ausgeführt sein können, sind auf der Trägerschicht (6) fixiert und reflektieren die gesamte Strahlung. Da sie als Reflektoren ausgeführt sind, werden Brechungen eingespart, weshalb eine etwas höhere Reflektivität zu erwarten ist. Diese kann darüber hinaus verbessert werden, indem metallisierte Prismen verwendet werden. In jedem Fall liegen einfallender (2) und ausfallender Lichtstrahl parallel zueinander. Die Verschweißungen (1) und die Deckschicht (4) sorgen für den Zusammenhalt der Elemente. Der möglichst temperaturbeständige Klebstoff (7) stellt das Bindeglied zwischen Kennzeichen und Reflexfolie dar.

Die Leuchtdichte L_1 [cd/m^2] (siehe Tabelle 2.1) der Folien variiert zwischen den Ausführungsformen. Die Variante mit eingekapselten Glaskugeln hat gegenüber der

eingebundenen Glasperlentechnik eine bis zu dreifach höhere Leuchtdichte. Eine weitere Steigerung der photometrischen Referenzgröße L_1 wird mit der mikroprismatischen Variante erzielt, welche dreifach mehr Licht zum Sender zurückwirft im Vergleich zur Ausführung mit eingekapselten Mikroglasperlen. Die mikroprismatische Methode kann daher auch in heller Umgebung starke Kontraste erzeugen, weshalb diese Folien auf Verkehrszeichen auf Autobahnen und Überlandstraßen angebracht werden. Somit ist auch bei hohen Geschwindigkeiten eine frühzeitige Erkennung möglich. In schwach beleuchteten Gegenden, wird innerorts die Glasperlenreflexfolie verwendet. Dies impliziert für den Detektionsalgorithmus, dass nicht nur die Reflektivität der Kennzeichen, sondern auch die der Verkehrszeichen variiert. Die vom Laserscanner gemessene Bestrahlungsstärke ist demnach abhängig von der Art der Reflexfolie.

Um die Unterschiede in den Rückstrahlwerten zu kennzeichnen, wurden Reflexionsklassen eingeführt. Je nach Anforderungen der spezifischen Anwendung kann eine der folgenden Klassen gewählt und daraus die benötigte Reflexfolie abgeleitet werden. Die nachfolgende Tabelle stellt diese Zuordnung dar.

Tabelle 2.4: Reflexionsklassen [15]

Reflexionsklasse	Reflexfolien-Aufbau
RA1	eingebundene Mikroglasperlen
RA2	eingekapselte Mikroglasperlen oder mikroprismatische Reflexkörper
RA3A (lange Distanz)	mikroprismatische Reflexkörper
RA3B (kürzere Distanz)	mikroprismatische Reflexkörper

Während für Verkehrszeichen vorgeschrieben wird, welche Reflexionsklasse für die jeweilige Anwendung gilt, gibt es für Kennzeichen keine vergleichbaren Vorgaben. Es wird vermutet, dass aufgrund des geringeren Herstellungsaufwandes eine Variante mit Glasperlen gewählt wird.

Neben den Variationen der Rückstrahlwerte gibt es Unterschiede hinsichtlich der Abhängigkeit des Reflexionsvermögens vom Einfallswinkel. Während die Glaskörper aufgrund der Kugelgeometrie keine Vorzugsrichtung aufweisen, gibt es bei den prismatischen Reflexstoffen eine Abhängigkeit des Rückstrahlwertes vom Einfallswinkel. Der Reflexionswert bei orthogonaler Anleuchtung darf bis zu 2,5-fach größer sein als bei schräger Anleuchtung. Hierzu existieren keine exakten Winkelvorgaben. Diese Abhängigkeit vom Einfallswinkel erfordert eine intensive Untersuchung in der Entwicklung einer automatisierten Kennzeichenerkennung insbesondere in der Nutzung von Intensitätsmerkmalen. [14], [15]

3 Konzept

Auf der Grundlage der erläuterten theoretischen Vorbetrachtungen wird im Folgenden die geplante Vorgehensweise bei den Messungen sowie der Algorithmenentwicklung dargestellt.

3.1 Messaufbau

Im Rahmen der Messungen wird untersucht, inwieweit die gemessene Bestrahlungsstärke E von ausgewählten Umfeldbedingungen abhängt. Das Ziel ist es, für ein Kennzeichen bei bekannten Umweltbedingungen einen Erwartungswert der Bestrahlungsstärke der auf dem Nummernschild befindlichen Messpunkte mit gewissen Toleranzen berechnen zu können. Diese Größe soll später genutzt werden, um aus Abweichungen von dem Erwartungsbereich die Witterung oder eine Verschmutzung der Sensorscheibe ableiten zu können.

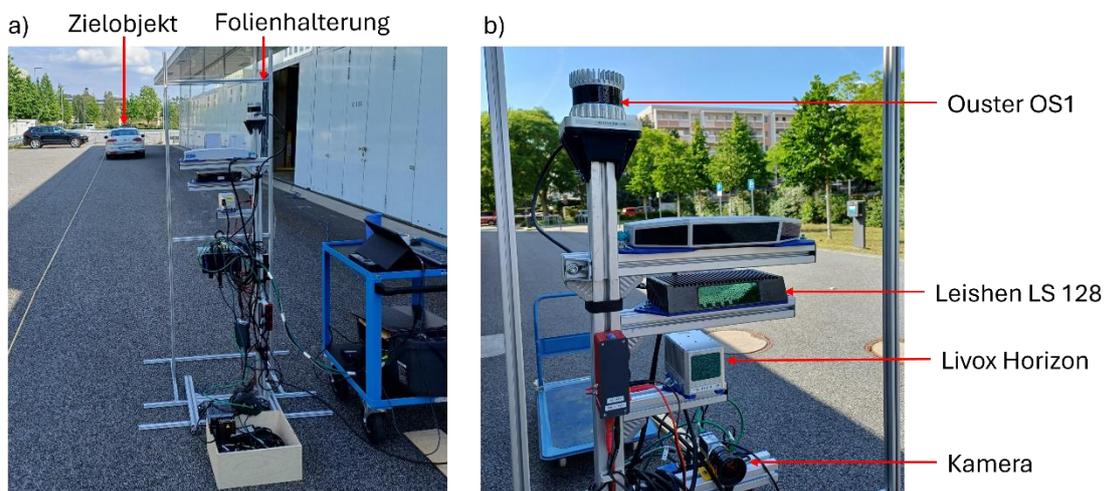


Abbildung 3.1: Messaufbau

Abbildung 3.1 zeigt eine Beispielmessung (a) sowie den Aufbau der Messtechnik (b). Aus Konstruktionsgründen konnten die Laserscanner nicht exakt übereinander positioniert werden, sodass deren optische Zentren in allen drei Dimensionen voneinander abweichen. Dies sollte jedoch keinen Einfluss auf die Bestrahlungsstärke haben. Das Zielobjekt und die Verschmutzungsfolien werden entsprechend der betrachteten Einflussfaktoren verändert.

In der nachstehenden Tabelle sind die untersuchten Einflüsse und deren Variationen zusammengefasst. Diese stellen lediglich eine Auswahl der realen Bedingungen dar.

Tabelle 3.1: Einflussfaktoren und deren Variationswerte

Umweltparameter	Wert des Umweltparameters
Objektentfernung r [m]	15, 20, 25, 30
Kennzeichenverwitterung	starke Verschmutzung, moderate Verschmutzung, Verblässung, Neuzustand
Einfallswinkel α [°]	0, 9, 17, 24, 39, 45, 52, 60, 72
Verschmutzung der Sensorscheibe	keine Verschmutzung, natürliche Verschmutzung, Pollen, wenig Sand, viel Sand, feine Wassertropfen (Nebel), grobe Wassertropfen (Regen)
Niederschlagsart	kein Niederschlag, Regen, Schneeregen
Niederschlagsintensität [mm/h]	0, ..., 4
Fahrbahnfeuchtigkeit	trocken, nass

Für die Untersuchung der Messbeeinflussung der Laserscanner infolge einer **Schmutzablagerung** werden verschiedene Arten von Verschmutzungen auf eine Klarsichtfolie mithilfe eines Klebstoffes aufgetragen. Damit das Haftmittel keinen nennenswerten Einfluss auf die Brechung und Beugung des Laserlichtes nimmt, wurde eine wasserbasierte hochtransparente Klebvariante genutzt, welche mit dem menschlichen Auge kaum wahrgenommen wird. Das Verwenden dünner Klarsichtfolien mit einer Dicke von circa $0,15\text{ mm}$ hält ebenso den optischen Einfluss des Trägermaterials in Grenzen. Die Verteilung der Schmutzpartikel erfolgt möglichst gleichmäßig, damit die Verschmutzungsdichte vor jedem LiDAR gleich ist. Die Folien werden auf einen Rahmen möglichst nah am Sensor aufgespannt, damit die Verschmutzung realitätsnahe Brechungen hervorruft (siehe Abbildung 3.1). Windböen können dazu führen, dass die Schmutzschicht ihren Abstand um bis zu 6 cm zu den optischen Sensoren verändert. Dies sollte jedoch keinen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Die Aufbringung der Verschmutzung erfolgte nicht direkt auf der Sensorscheibe, da einerseits das wiederholte Aufbringen und rückstandslose Entfernen der Ablagerung sehr zeitintensiv ist. Zudem ist es schwer möglich, die Schmutzpartikel ohne Haftmittel künstlich aufzubringen.

3.4 Datenvorverarbeitung

Um Algorithmen entwickeln zu können, die universell für alle Laserscanner nutzbar sind, soll bereits in der Vorverarbeitung eine Harmonisierung der verschiedenen Punktwolken durchgeführt werden.

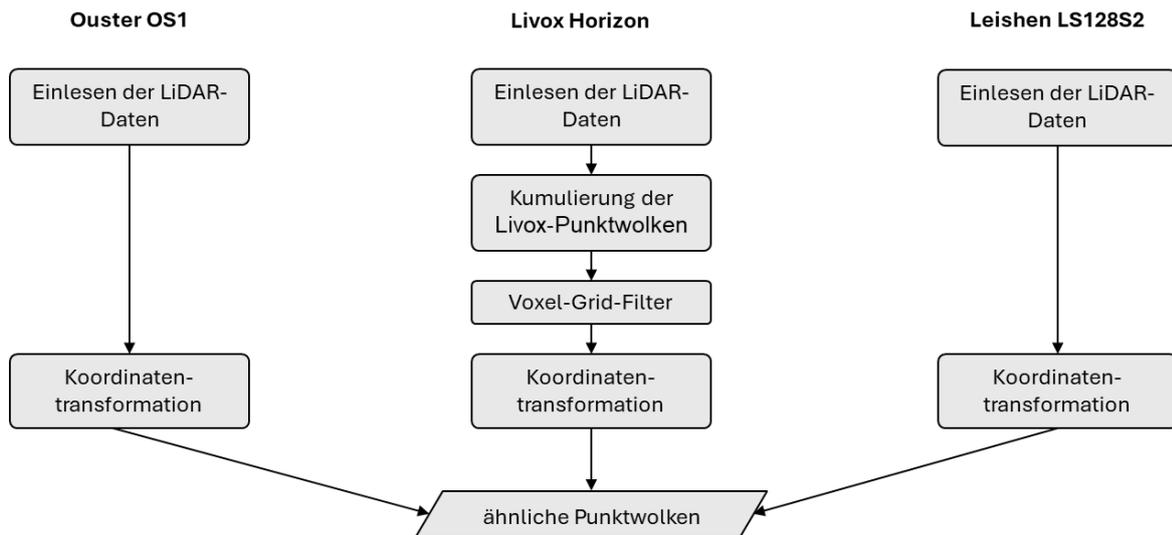


Abbildung 3.2: sensorspezifische Datenvorverarbeitung

Abbildung 3.2 stellt das Konzept der Datenvorverarbeitung dar. Die unterschiedliche Vorgehensweise resultiert aus den verschiedenen Scanmechanismen. Die Punktwolken unterscheiden sich zwischen den Laserscannern unter anderem in der Punktdichte und Ausdehnung sowie in der Ausrichtung des Koordinatensystems.

3.5 Etablierte Filteralgorithmen

Eine ausgiebige Patent- und Literaturrecherche hat gezeigt, dass es keine Veröffentlichungen gibt, die sich mit dem Erkennen der Fahrzeugkennzeichen in Lidar-Punktwolken beschäftigen. Im Folgenden wird kurz die Vorgehensweise einer Verkehrsschilderkennung beschrieben, um nützliche Algorithmen für die Kennzeichenerkennung zu übernehmen.

Die Verkehrszeichenerkennung nutzt die Retroreflexion der Schilder, um diese von der Umgebung zu separieren. Es existieren zwar auch Algorithmen, die ohne die Reemissionsinformationen Verkehrszeichen aufgrund ihrer Form und Position detektieren. Die vorliegende Methode ist jedoch von Bedeutung, da hier Parallelen zur entwickelten Kennzeichenerkennung sichtbar werden.

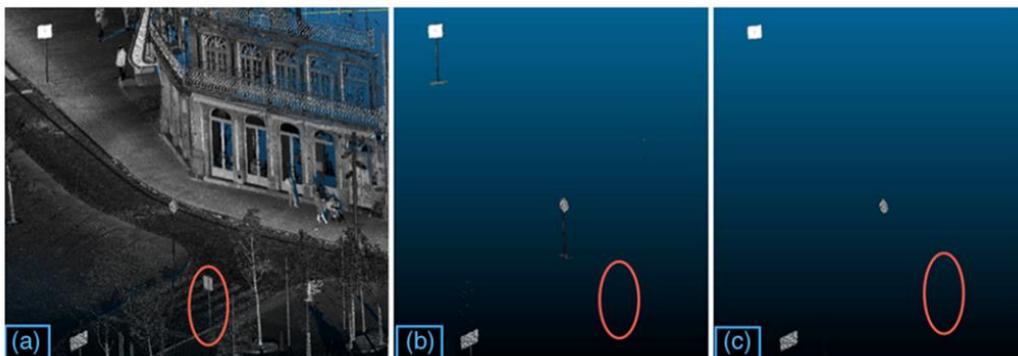


Abbildung 3.3: zweistufige Segmentierung der Verkehrszeichen [16]

Fahrzeugkennzeichen und Verkehrsschilder haben als Retroreflektoren höhere Reflexionswerte als andere Oberflächen. Es kann eine Filterung anhand des Intensitätsbereiches vorgenommen werden, in dem alle Verkehrszeichen liegen (siehe Abbildung 3.3, a). Da die untersuchten Objekte die höchsten Reflexionswerte aufweisen, kann auf den oberen Schwellenwert verzichtet werden. Um den unteren Grenzwert festlegen zu können, werden Punktwolken hinsichtlich ihrer Bestrahlungsstärke untersucht. Segmente, die eine Intensität oberhalb eines geschätzten Schwellwertes haben, werden sondiert (b). Es schließt sich eine Auswertung im Intensitätshistogramm an, sodass eine zweite Anpassung des Intensitätsmittelwertes erfolgen kann (c). Das geschieht auf der Grundlage des Wissens über die Intensitätsverteilung möglichst vieler untersuchter Verkehrszeichen. Es ist zu erkennen, dass ein geschätzter Schwellwert auch beispielsweise die Stützstange des Kennzeichens aufgrund der hohen Intensität auswählt (b). Die Verbesserung des Filterergebnisses aufgrund der berechneten Intensitätsgrenze wird in (c) deutlich.

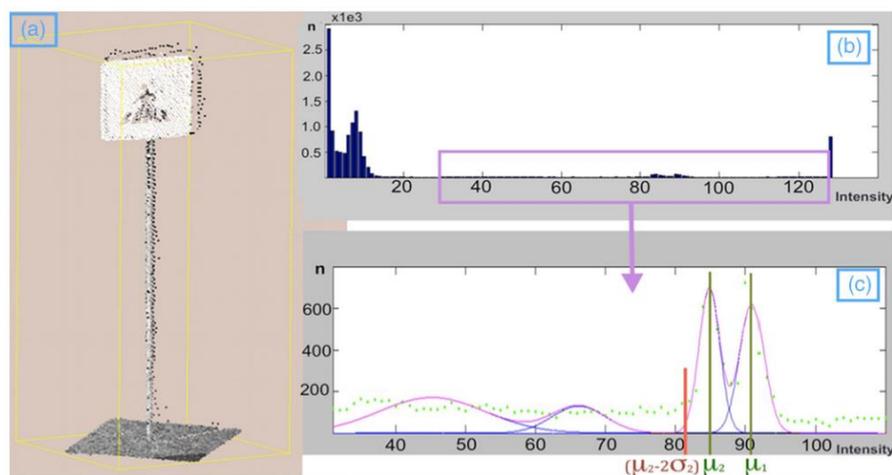


Abbildung 3.4: Ermittlung der optimalen Intensitätsgrenze, a) Zielobjekt nach grober Intensitätsfilterung, b) Histogramm der Intensitätswerte, c) Sondieren der Normalverteilung des Schilds [16]

Abbildung 3.4 visualisiert, wie mithilfe des Gaußschen Mischmodells (c) die überlagerten Häufigkeitsverteilungen der Bestrahlungsstärkewerte separiert werden. Die Intensitätsverteilung der Verkehrszeichenhalterung, die sich um μ_2 verteilt, wird ausgeblendet. Mithilfe der verbleibende Glockenkurve mit dem Erwartungswert μ_1 kann der optimierte Schwellwert ($\mu_2 - 2 * \sigma_2$) abgelesen werden. Anhand dieses Wertes kann die Halterung von dem Verkehrszeichen getrennt werden. Im Rahmen der eigenen Algorithmenentwicklung ist zu prüfen, ob mithilfe des Gaußschen Mischmodells in jeder Situation Kennzeichen extrahiert werden können.

Die gefilterten Punkte werden anschließend geclustert. Riveiro u.a. nutzen hierfür das DBSCAN-Verfahren (engl. *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*), wobei der Suchradius und die Mindestanzahl der Punkte, welche in diesem Umkreis liegen, festgelegt werden muss. Um Autolampen, Laternenpfähle und andere gewölbte Objekte

auszusortieren, schließt sich eine Krümmungsanalyse an. Durch eine Formerkennung können die extrahierten Verkehrszeichen schließlich untereinander unterschieden werden. Um die geringe Auflösung des Lasers auszugleichen, werden die Zwischenräume mithilfe der mathematischen Morphologie aufgefüllt, um eine Abbildung der Silhouette erzeugen zu können.

3.6 Gewählte Filteralgorithmen

Aus der umfangreichen Recherche ging hervor, dass eine reine deterministische Clusterung nicht ausreicht, um aus der vielfältigen Umgebung Objekte zu filtern. In der vorgestellten Verkehrszeichenerkennung wurde beispielsweise eine Kombination aus DBSCAN (deterministisch/ hart) und Gaußschem Mischmodell (weich, engl. *fuzzy*) realisiert. Während harte (deterministische) Segmentierungslogiken jeden Punkt eindeutig zu einem Cluster zuordnen, können Punkte bei der weichen Clusterung zu mehreren Segmenten gehören. Hierbei wird für jeden Messpunkt ein Wahrscheinlichkeitswert für jedes Cluster berechnet. Für die Entwicklung der Kennzeichenerkennung wird ebenfalls eine Kombination aus beiden Segmentierungsarten verfolgt.

Nach der Clusterung sollen die charakteristischen Merkmale der Kennzeichen genutzt werden, um diese von anderen Objekten zu unterscheiden. Hierbei wird vermutlich eine Kombination aus mehreren Filtern erfolgreich sein.

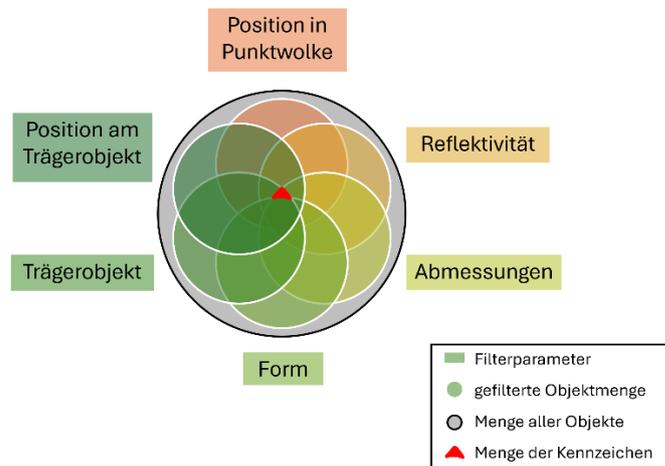


Abbildung 3.5: Eigenschaften der Kennzeichen als Filterparameter

In der Abbildung 3.5 sind die geplanten Filterparameter zusammengefasst. Jeder Filter extrahiert eine Teilmenge aller Objekte. Folglich sollte die Schnittmenge aller Filterergebnisse ausschließlich die Fahrzeugkennzeichen beinhalten. Nach der Sondierung aller Nummernschilder muss im letzten Schritt eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Kennzeichenexemplaren innerhalb eines Frames erfolgen. Dies wird als Instanzsegmentierung bezeichnet.

3.7 Klassen der Messpunkte

Da im späteren Verlauf der Messauswertung erkannt wird, dass das Grundkonzept (siehe Anlage A) sowohl für die Witterungs- als auch für die Verschmutzungsapproximation nicht zielführend ist, erfolgt hiermit die Vorstellung der alternativen Methode, mit der die **Verschmutzungsdetektion** realisiert wird.

Im Messbetrieb produziert jeder der drei verwendeten Laserscanner ein eigenes Laserecho. Hierbei wird ein kleiner Teil der Laserstrahlung direkt an der Sensorscheibe reflektiert. Diese scheinbaren Reflexionen können von den realen Messpunkten unterschieden werden, da unmittelbar nach dem Startsignal PA das Empfangssignal PB erzeugt wird (siehe Abbildung 2.6). Durch diese Vorgehensweise entsteht die Nebenwirkung, dass nahstehende Objekte ebenfalls als scheinbare Reflexion klassifiziert werden. Daher definieren die Hersteller einen Nahbereich, in dem keine Vermessung des Umfeldes erfolgt. In diesem Gebiet ist der Messfehler der Objektentfernung zu groß, um zu unterscheiden, ob der empfangene Strahl an einem nahen Objekt oder an der Sensorscheibe reflektiert wurde. Diese erhebliche Messunsicherheit gilt vorrangig für die Messmethode der Pulslaufzeit. Da alle drei Laserscanner diese Technik verwenden, existiert für jeden Umfeldsensor solch ein kritischer Areal. Die erhöhte Messunsicherheit im Nahbereich mit dem Lichtlaufzeitverfahren resultiert aus der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Die kurze Wegstrecke, die die elektromagnetischen Wellen von der Strahlungsquelle bis zu den Photosensoren im Nahbereich zurücklegen, führt dazu, dass die Dauer zwischen dem Senden und dem Empfangen des Laserpulses gegen null geht. Die Grenzwerte der zulässigen x-Koordinaten der sensorspezifischen Nahbereiche sind in Tabelle 2.2 aufgeführt. Die Reflexionen, die in diesem Gebiet entstehen und zum Laserscanner gelangen werden im weiteren Verlauf als Nahbereichsreflexionen bezeichnet. In den Messdaten sind sie in der Form $v_{nah} = (0; 0; 0)$ zu finden.

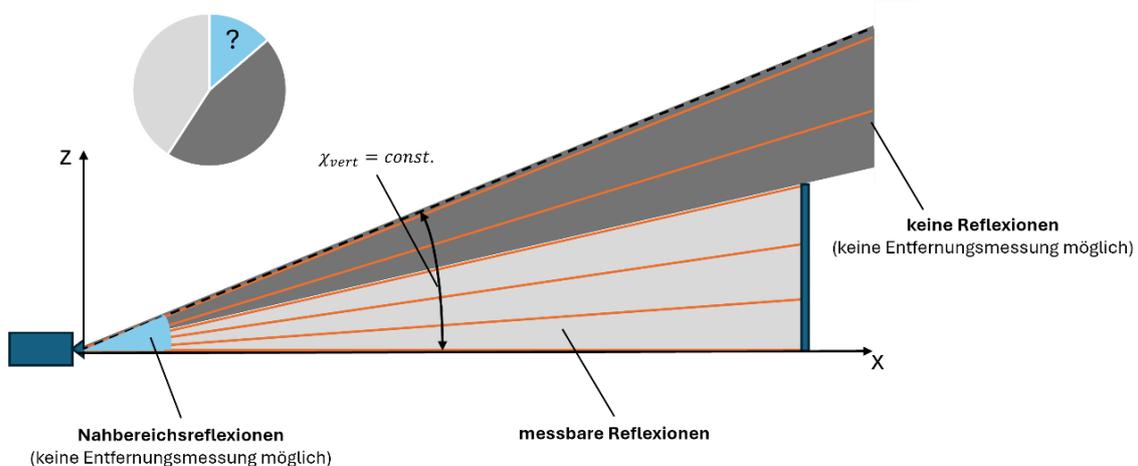


Abbildung 3.6: sensorinterne Klassifikation der Messpunkte

Abbildung 3.6 stellt die Klasseneinteilung der Reflexionspunkte dar. Neben den beschriebenen Nahbereichsreflexionen gibt es messbare Spiegelungen, die an Objekten im Erfassungsbereich entstehen. Für diese ist eine Positionsmessung möglich. Daher liegen sie im Datensatz in der Form $v_{messbar} = (x; y; z)$ mit $x, y, z \neq 0$ vor. Laserstrahlen, die nicht zurück zu den Photosensoren gelangen, können nicht für die Entfernungsmessung verwendet werden. Die Angabe erfolgt daher folgendermaßen: $v_{verloren} = (NaN; NaN; NaN)$.

3.8 Nässebedingte Spiegelungen

Für die **Witterungserkennung** wurden zwei Teilmethoden entwickelt, die verschiedenen Aspekte der Wetterverhältnisse beleuchten:

Einen Teil bildet die Abschätzung der Feuchtigkeit des Untergrundes, die aufgrund von Regen entstanden ist. Dazu werden scheinbare Objekte gesucht, die durch Spiegelung an der Bodenebene erzeugt wurden.

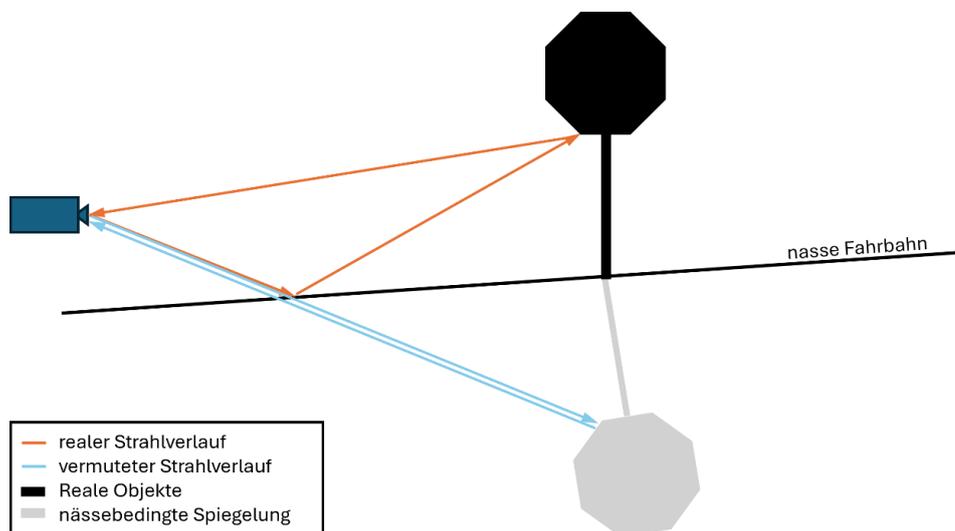


Abbildung 3.7: Entstehung eines scheinbaren Objekts unter der Bodenebene

In der Abbildung 3.7 wird die Entstehung einer durch die Feuchtigkeit der Fahrbahn verursachte Bodenreflexion verdeutlicht. Der reflektierende Gegenstand befindet sich in der Realität über der Bodenebene. Die Richtung des ausgesendeten Laserpulses zusammen mit der gemessenen Laufzeit führen dazu, dass das sensorinterne Rechenwerk diesen Reflexionspunkt unterhalb der Bodenebene platziert. Es geht stets davon aus, dass der Ein- und der Ausgangsstrahl parallel verlaufen.

3.9 Rauschpunktanalyse

Im Kontext der **Witterungserkennung** wird neben der Analyse der Fahrbahnfeuchtigkeitsdetektion der Niederschlag von einem separaten Algorithmus analysiert. Anfänglich wurde der Ansatz verfolgt, dass der Niederschlag eine Erhöhung des Positionsfehlers der Objekte

hervorrufen. Speziell wurden hier die Kennzeichen genutzt, und deren Flächenschwerpunkt über die Messung beobachtet. Tatsächlich gibt es bei statischen Nummernschildern ständige Positionsänderungen. Diese sind jedoch sehr gering und treten ebenso bei einer verschmutzten Sensorscheibe auf. Stattdessen wird die Besonderheit genutzt, dass bei Messungen, in denen es schneit oder regnet, im Nahbereich ($x \leq 20 \text{ m}$) vereinzelte Reflexionspunkte auftreten, die zu keinem Objekt gehören.

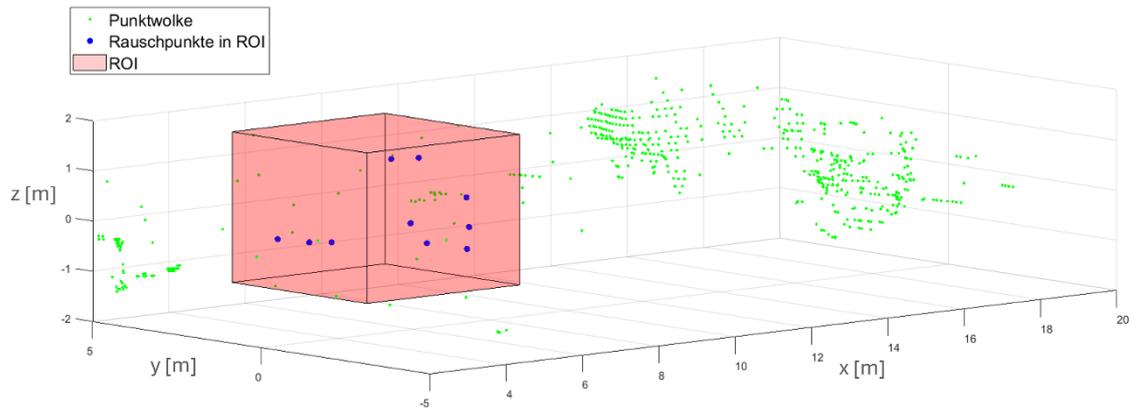


Abbildung 3.8: Beobachtungsquader für die Auswertung der Anzahl der Rauschpunkte (Bsp.: Ouster OS1)

In Abbildung 3.8 sind im roten Quader die durch den Niederschlag hervorgerufenen Rauschpunkte ersichtlich. Vermutlich sind diese Erscheinungen auf Reflexionen an den Wassertropfen beziehungsweise Eiskristallen zurückzuführen. Die zufällige Verteilung der Rauschpunkte in dem konstanten Volumen führt dazu, dass die Anzahl der Punkte in dem Volumenkörper in einer Messung um einen Mittelwert schwankt. Vereinfacht kann daher von einer Gleichverteilung im Quader ausgegangen werden. Daher darf sowohl die Punktdichte als auch die Punktzahl als Richtwert für die Niederschlagsarten und -mengen genutzt werden. Da die Analyse der Punktzahl weniger Rechenbefehle erfordert, wird die Abschätzung der Witterung durch das Zählen der Rauschpunkte im Beobachtungsgebiet realisiert.

4 Umsetzung und Implementierung

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Konzepte erläutert. Hierbei werden die genutzten Schwellwerte anhand von geometrischen beziehungsweise physikalischen Beziehungen hergeleitet. Ist dies nicht möglich, erfolgt eine Beschreibung der empirischen Vorgehensweise. Die entwickelten Funktionen und Skripte wurden dem Datenträger (siehe Anlagen, Abbildung F.1) beigefügt. Deren Bezeichnung und Funktionsweise sind in den Anlagen in der Tabelle F.1 zusammengefasst.

4.1 Datenvorverarbeitung

Im Folgenden werden die geplanten Schritte dargestellt, die erforderlich sind, um die Erkennung der Kennzeichen, der Sensorverschmutzung sowie der Witterung zu ermöglichen.

4.1.1 Einlesen der Daten

Die Datenverarbeitung arbeitet nach dem Prinzip des sogenannten Post Processings. Hierbei wird der Messdatenstrom nicht in Echtzeit ausgewertet. Stattdessen nutzen die Algorithmen den gespeicherten Datensatz, um diesen in seiner Gesamtheit nach der Messung zu verarbeiten. Daraus entsteht die Herausforderung, dass die Speicherdaten sensorspezifisch abgelegt werden. Folgende Dateitypen können die Messdaten der Sensoren beinhalten:

- **lvx**-Datei (proprietares Dateiformat für Livox-Messdaten): Dieses proprietäre Dateiformat enthält alle Punktwolken und Intensitätsmesswerte einer Messung des Livox Horizon. Die Konvertierung in eine lesbare Punktwolke erfolgt mit der Software von F. Blechschmidt. [17]
- **pcap**-Datei (engl. *Packet Capture Data*): In diesen Netzwerkpaketen sind alle Punktwolken und Messwerte der Bestrahlungsstärke einer Messung enthalten. Die LiDAR-Konfiguration ist einer beigefügten **json**-Datei zu entnehmen. Für das Einlesen wird die Matlab-Konvertierungsfunktion *ousterFileReader* verwendet.
- **pcd**-Datei (engl. *Point Cloud Data*): Dieser Dateityp ist speziell für die Speicherung einzelner Punktwolken vorgesehen. Nach einer Messung liegen daher mehrere pcd-Dateien vor, deren Daten mit dem Befehl *pcread* extrahiert werden.
- **db3**-Datei (engl. *Database 3*): Dies ist ein Dateiformat, in welchem im Vergleich zu den vorhergehenden Dateitypen die Messdaten mehrerer Sensoren enthalten sein können. Bevor die Datenpakete eingelesen werden, müssen die relevanten Daten anhand der Titel der ROS2-Nachrichten (engl. *Robot Operating System*) gefunden und entschlüsselt werden. ROS ist ein sogenanntes Framework. Es wird in diesem Kontext genutzt, um eine systemübergreifende Kommunikation mehrerer Laserscanner zu ermöglichen.

Damit die entwickelten Algorithmen in der Zukunft verwendet werden können, ohne dass Kenntnisse über die Besonderheiten der Speicherformate vorhanden sein müssen, wurde ein Datei-Konvertierungs-Werkzeug entwickelt, welches möglichst benutzerfreundlich eines der vier möglichen Dateiformate einliest, um sie im Anschluss auswerten zu können. Zugleich wird auf Anfrage eine mat-Datei (proprietäres Dateiformat in Matlab) erstellt, um bei späteren Auswertungen erneute Datei-Konvertierungen zu umgehen. Das zentrale Skript zum Einlesen und Konvertieren der Daten ist im Datenträger unter der Bezeichnung *raw2readable.m* zu finden.

4.1.2 Datenreduktion

Im Abschnitt 2.4 wurde bereits erläutert, dass die Punktdichte des Livox-Scanners mit der Integrationszeit steigt. Im Hinblick auf die Detektion statischer Objekte ist eine Kumulierung mehrerer Punktwolken sinnvoll, da aus der Vielzahl an Punkten eine Erhöhung der Positionsgenauigkeit und Punktdichte hervorgeht. Dies gilt nicht für die Mehrzeilenscanner, da die Abtastpunkte in jedem Scanzzyklus in erster Näherung übereinanderliegen. Des Weiteren kann mit der Überlagerung mehrerer bereits segmentierter Punktwolken eine Schätzung der Eigen- und der Zielobjektbewegung erfolgen. Die Kumulierung soll nachfolgend einem anderen Zweck dienen. Während die Ebenenscanner Ouster und Leishen mit diskreten Abtastmustern arbeiten, nutzt der Livox eine kontinuierliche Linsenrotation. Dennoch speichert das Messsystem die Reflexionspunkte in diskreten Punktwolken ab. Aus der ständigen Veränderung des Linsenpaars folgt, dass selten Punkte übereinander liegen, weshalb das gesamte Sichtfeld abgetastet werden kann. Um diesen Vorteil für statische Szenarien zu nutzen wird eine Verkettung mehrerer Punktwolken durchgeführt, indem die Punktmatrizen mit der Matlab-Funktion *pccat* aneinandergereiht werden.

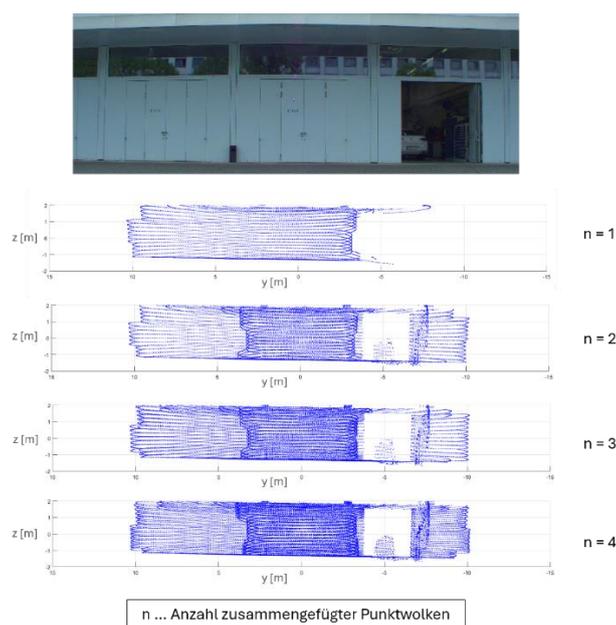


Abbildung 4.1: Kumulierung mehrerer Punktwolken (Livox Horizon)

Die Abbildung 4.1 zeigt, wie sich die Punktdichte mit steigender Anzahl n kumulierter Punktwolken erhöht. Es ist ersichtlich, dass die Punktdichte zwischen $n = 1$ und $n = 2$ stark ansteigt, während durch weitere Kumulierung ($n > 2$) nur noch wenig Veränderungen zu verzeichnen sind. Dieses Verhalten spiegelt den abflachenden Anstieg der Kennlinie wider, welche die Sichtfeldabdeckung in Abhängigkeit der Integrationszeit beschreibt (siehe Abbildung 2.10). Aus dieser Abbildung ging hervor, dass nach rund 0,2 Sekunden bereits 84 % des Sichtfelds gescannt wurden. Da eine Speicherung repetitiv nach 0,1 Sekunden erfolgt, kann dieser Prozentwert bereits durch die Kumulierung zweier Frames erreicht werden. Ferner führt die Akkumulation $n > 2$ Punktwolken bei Relativbewegungen zu einer verzerrten Darstellung. Eine parametrische Verkettung in Abhängigkeit der Dynamik ist an dieser Stelle nicht möglich, da die Kumulierung in der Datenvorverarbeitung angewendet wird und daher noch keine Information über die Relativgeschwindigkeiten zwischen dem LiDAR und der Umgebung vorliegt.

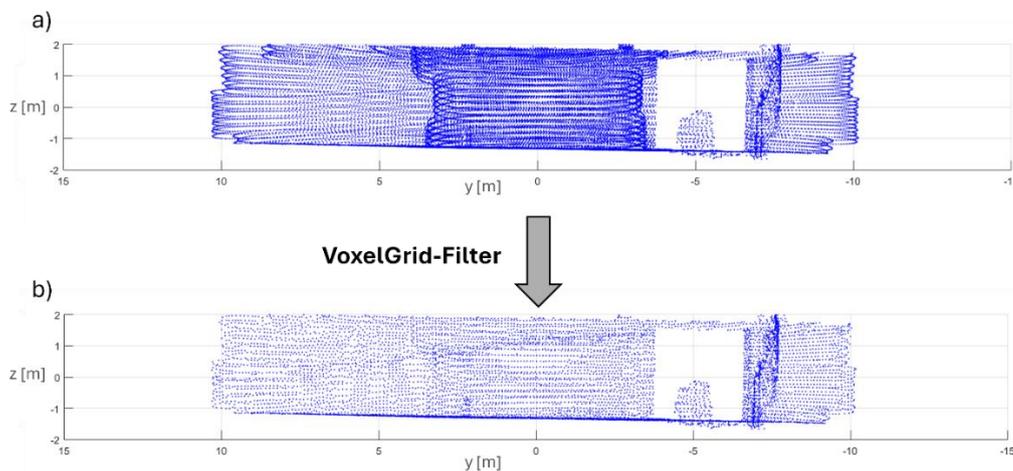


Abbildung 4.2: Anwendung des VoxelGrid-Filters (Livox Horizon)

In Abbildung 4.5 ist die Datenreduktion (engl. *Downsampling*) der kumulierten Punktwolke (a) dargestellt. Hierbei wird ein VoxelGrid-Filter angewendet. Dieser teilt im ersten Schritt das räumliche Koordinatensystem in ein Raster auf. Alle Punkte innerhalb eines Rasterwürfels werden zu einem Punkt vereinigt. Die Position des erzeugten Punktes ist gleich dem geometrischen Schwerpunkt der Punkte innerhalb des Rasterelements. Durch die Anwendung dieses Filters verringert sich die Punktzahl maßgeblich, was sich positiv auf die Rechenzeiten der nachfolgenden Algorithmen auswirkt. Des Weiteren wird eine gleichmäßige Punktverteilung (b) erzeugt, die denen der Ebenenscanner ähnelt. Durch diese Harmonisierung der Sensordaten kann eine Datenverarbeitung entwickelt werden, welche universell auf die drei Laserscanner anwendbar ist. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die finale Livox-Punktwolke im Gegensatz zu den Ebenenscannern entfernungsunabhängig konstante Punktabstände in allen drei Dimensionen aufweist. Dies gilt allerdings nur für den Bereich bis schätzungsweise 25 m, in welchem die Punktabstände der verketteten Punktwolke ohne VoxelGrid-Filter kleiner sind als die Gitterweite d_{Gitter} des Rasters. Dieser

Parameter sollte möglichst groß gewählt werden. Eine Gitterweite, die kleiner ist, als der durchschnittliche Abstand benachbarter Punkte führt dazu, dass keine Datenreduktion durchgeführt werden kann.

Im Abschnitt 4.2.4 wird erklärt, dass ein Segment mindestens drei Punkte beinhalten muss, um dessen Breite sicher berechnen zu können. Daher wird der maximale Punktabstand gesucht, für den auch bei ungünstiger Punktverteilung mindestens drei Laserstrahlen von dem Kennzeichen reflektiert werden. Da einzeilige wesentlich häufiger als mehrzeilige Kennzeichen im Straßenverkehr vertreten sind, erfolgt die Ermittlung der Gitterweite auf Grundlage eines $b = 522 \text{ mm}$ breiten und $h = 108 \text{ mm}$ hohen Kennzeichens.

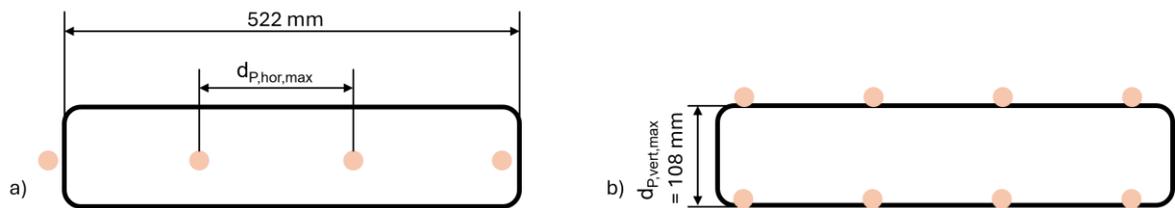


Abbildung 4.3: Grenzfälle der Kennzeichenerkennung aufgrund hoher Objektentfernung, a) Breitenmessung, b) Höhenmessung

Abbildung 4.3 visualisiert die beiden Grenzfälle, in welchen gerade noch eine Vermessung eines einzeiligen, senkrecht zur Laserachse ausgerichteten, Kennzeichens möglich ist. Für den Fall, dass die Entfernung so hoch ist, dass gerade noch eine Breitenmessung (a) beziehungsweise Höhenmessung (b) durchgeführt werden kann, betragen die Punktabstände: $d_{P,hor,max} = \frac{522 \text{ mm}}{3} = 174 \text{ mm}$ und $d_{P,vert,max} = 108 \text{ mm}$. Da das Raster aus würfelförmigen Zellen besteht, kann nur ein Längenwert berücksichtigt werden. Ferner sollte die Gitterweite möglichst groß, jedoch so gering sein, dass für beide Grenzfälle eine Erkennung möglich ist. Daher wird der kleinere Abstandswert $d_{P,vert}$ ausgewählt. Liegen zwei benachbarte Punkte der verketteten Punktwolke auf den Gittergrenzen, so beträgt der maximale Abstand zweier benachbarter Punkte im ungünstigen Fall das Doppelte der Gitterweite. Es gilt:

$$d_{Gitter} \leq \frac{d_{P,vert}}{2} = 54 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Als Eingangswert des VoxelGrid-Filters wird die Abmessung der Würfelemente auf $d_{Gitter} = 50 \text{ mm}$ festgelegt.

Für die Witterungserkennung wird es von Vorteil sein, viele Punkte auswerten zu können. Aus diesem Grund ist die Kumulierung der Livox-Punktwolken auch ohne VoxelGrid-Filter mit einer einfachen Verkettung beliebig vieler Punktwolken möglich. Die Anzahl der vereinigten Punktwolken wurde parametrisch gestaltet. Somit können für die Auswertung statischer Messungen viele Punktwolken verkettet werden. Bei der Betrachtung von Rela-

tivbewegungen ist es dahingegen ratsam, weniger Scans zusammenzufügen. Die parametrische Funktion wurde als *mergeLvxPCs.m* bezeichnet und befindet sich im beigefügten Datenträger.

4.1.3 Koordinatentransformation

Die Datenvorverarbeitung wird mit der Koordinatentransformation abgeschlossen (siehe Abbildung 3.2). Um die Form und die Größe der Objekte beizubehalten wird die rigide Transformationsmethode angewendet. Die zugrundeliegende mathematische Logik wird in der Anlage B) erläutert. Daraus geht hervor, dass die ebene Transformation der drei Koordinatensysteme mithilfe eines Rotationswinkels φ um die z-Achse eindeutig definiert ist. Die Matlab-Bibliothek hält für die starre Transformation die Funktion *rigidtfom3d* bereit. Der Befehl *pctransform* erzeugt schließlich die transformierte Punktwolke. Der Rotationswinkel φ um die z-Achse ist für jeden der drei betrachteten LiDAR-Scanner in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 4.1: sensorspezifische Transformationswinkel

LiDAR	Rotationswinkel φ um z-Achse	Rotationsmatrix B_k^l
Ouster OS1	180°	$\begin{bmatrix} \cos 180^\circ & -\sin 180^\circ \\ \sin 180^\circ & \cos 180^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Leishen LS128	270°	$\begin{bmatrix} \cos 270^\circ & -\sin 270^\circ \\ \sin 270^\circ & \cos 270^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$
Livox Horizon	0°	$\begin{bmatrix} \cos 0^\circ & -\sin 0^\circ \\ \sin 0^\circ & \cos 0^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

Bei der Wahl des passenden Transformationswinkels, wird darauf geachtet, dass die finalen Achsen, wie in der DIN ISO 8855:2013 (siehe Abbildung B.1, b) vorgesehen, angeordnet sind [18]. Diese Konvention wurde gewählt, damit sich die Fahrzeugdaten und die Umgebungspunkte auf die gleiche Ausrichtung des Koordinatensystems beziehen. Es ist lediglich eine Translation zwischen dem Koordinatenursprung des Fahrzeugs und dem des Laserscanners zu beachten.

4.2 Kennzeichenerkennung

Nachdem die Daten eingelesen und transformiert wurden, können die uniformierten Punktwolken ausgewertet und verarbeitet werden. Die Verarbeitungsschritte sind in Form von Programmablaufplänen (siehe Anlagen, Abbildung D.1 und Abbildung D.2) zusammenge-

fasst und werden im Folgenden detailliert beschrieben. Der Aufruf dieser speziellen Funktionen erfolgt mit dem zentralen Skript *main_licenseplates.m*.

4.2.1 CropBox-Filter

Um sich auf den relevanten Bereich vor dem Laserscanner zu fokussieren, wird eine ROI (engl. *region of interest*) definiert. Es werden die Punkte innerhalb dieser Beobachtungszone mit dem Matlab-Befehl *findPointsInROI* ermittelt und mit der Funktion *select* als separate Punktwolke extrahiert. Für die Sichtfeldeingrenzung ist eine quaderförmige ROI ausreichend. Diese wird in Matlab durch sechs Parameter festgelegt. Das sind die Minimal- und Maximalwerte der drei räumlichen Koordinaten. Um neben vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern auch Fahrzeuge am Straßenrand beziehungsweise in anderen Fahrstreifen zu detektieren, wird die Breite des Beobachtungsbereichs auf *10 m* festgelegt und kann vom Anwender beliebig verändert werden. In vertikaler Richtung sollte die Zone so erweitert werden, dass sowohl die Bodenebene als auch vier Meter hohe Lastkraftwagen vollständig zu sehen sind.

Für die beiden Mehrzeilenscanner kann die maximale Entfernung über den definierten horizontalen beziehungsweise vertikalen Teilöffnungswinkel berechnet werden. Aus Abbildung 4.3 ging hervor, dass die maximale Objektdistanz für eine sichere Kennzeichenerkennung dort erreicht wird, wo der horizontale Punktabstand $d_{P,hor} \leq 174 \text{ mm}$ oder die vertikale Differenz $d_{P,vert} \leq 108 \text{ mm}$ beträgt. Der maximale Objektabstand r_{max} , in dem in jedem Fall genügend Punkte auf dem Kennzeichen liegen, beträgt:

$$r_{max,hor} = \frac{d_{P,hor}}{\tan(\chi_{horiz})} \quad (4.2)$$

beziehungsweise

$$r_{max,vert} = \frac{d_{P,vert}}{\tan(\chi_{vert})} \quad (4.3)$$

Diese Gleichungen gelten nicht für den Livox Horizon. Für diesen wurde der Entfernungsgrenzwert empirisch ermittelt. Die Ergebnisse sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 4.2: sensorspezifische Entfernungsgrenzwerte

	Laserscanner		
	Ouster OS1	Leishen LS128S2	Livox Horizon
$r_{max,hor} \text{ [m]}$	14,24/ 28,35/ 56,72	49,85	≈ 25
$r_{max,vert} \text{ [m]}$	8,84	30,94	≈ 25

Die drei Entfernungsgrenzwerte des Ouster OS1 für den Grenzfall der horizontalen Auflösung resultieren aus der Einstellmöglichkeit, die für diesen Laserscanner standardmäßig vorgesehen ist. Um in jedem Fall eine Kennzeichenerkennung zu ermöglichen, müssen die Minimalwerte der Ergebnisse je Sensor betrachtet werden. Der Ouster OS1 kann demnach lediglich bis in eine Entfernung von $r \approx 9 \text{ m}$ eine sichere Kennzeichenerkennung garantieren, während mit dem Leishen LS128S2 bis zu einer Distanz von circa 31 m Nummernschilder genügend Messpunkte für eine Größenmessung aufweisen (siehe Tabelle 4.2). Bei den errechneten Werten handelt es sich um die euklidischen Abstände (Radius). Für den Beobachtungsbereich wird der maximale x-Wert auf $x_{max} = 25 \text{ m}$ festgelegt. Eine sensorspezifische ROI ist realisierbar, die Messunsicherheit der Bestrahlungsstärke in weiterer Entfernung erschwert jedoch die spätere Intensitätsfilterung. Mit dem gewählten universellen Einstellwert wird im Messbetrieb des Ouster OS1 hingenommen, dass Kennzeichen, welche sich zwischen zwei Punktreihen befinden, nicht wahrgenommen werden können. Ferner wurde festgestellt, dass im Nahbereich bis $r \approx 15 \text{ m}$ dunkle Oberflächen eine ähnlich hohe Reflektivität wie die Retroreflektoren aufweisen. Zudem schreiben die Hersteller ohnehin einen Mindestabstand der zu erkennenden Objekte von der Laseroptik vor. Folgende Matrix fasst die Schranken des Beobachtungsgebietes zusammen:

$$A = [x_{min}; x_{max}; y_{min}; y_{max}; z_{min}; z_{max}]$$

$$A = [15; 25; -5; 5; -3; 4]$$

Mithilfe dieser allgemeingültigen Beobachtungszone können zudem die Intensitätswerte der Sensoren hinsichtlich der Witterungs- und Verschmutzungserkennung besser miteinander verglichen werden.

4.2.2 Bodensegmentierung

In diesem Verarbeitungsschritt werden die Bodenpunkte aus der Punktmatrix entfernt. Um die Punkte zu finden, welche vom Untergrund reflektiert wurden, wird ein sogenannter SMRF (engl. *simple morphological filter*) genutzt. Die Funktionsbeschreibung dieses Algorithmus ist in entsprechender Literatur zu finden. [1], [19]

4.2.3 Intensitätsfilterung

Anhand der Abbildung 2.4 wurde erläutert, dass Kennzeichen als Retroreflektoren nahezu das gesamte einfallende Licht zum Sender reflektieren. Dies bewirkt eine sehr hohe messbare Bestrahlungsstärke an den Photodioden des LiDAR-Scanners. Auf dieser Grundlage ist es in der Detektion von Retroreflektoren üblich (siehe Abschnitt 3.5), eine Intensitätsfilterung vorzunehmen. Damit wird die Datenmenge für die anschließende Clusterung erheblich gesenkt. Ferner ist es durch die hohe Reflektivität erst möglich, das Kennzeichen

vom restlichen Fahrzeug mithilfe einer Intensitätsmindestwertes zu extrahieren. Eine mathematische Herleitung einer Intensitätsschwelle ist nicht möglich, da vom Gesetzgeber durch den Alterungsprozess des Nummernschilds bereits eine Reflektivitätsreduzierung auf 20 % bezogen auf den Neuzustand erlaubt ist (siehe Abschnitt 2.5.3). Folglich wird empirisch untersucht, in welchem Intensitätsbereich diese Retroreflektoren liegen. Hierfür wurden Messungen beschafft, in denen sich die Objekte möglichst in folgenden Kernpunkten voneinander unterscheiden: Entfernung, Relativgeschwindigkeit, Abmessungen, Schrägstellung. Diese Messungen wurden anschließend intensiv untersucht. Das hohe Rückstrahlvermögen der retroreflektiven Fahrzeugkennzeichen wird hierbei genutzt, um die potenziellen Zielobjekte mithilfe eines festen Schwellwertes von anderen Oberflächen abzugrenzen. Eine Alternative wäre eine Punktfilterung anhand von lokalen Intensitätsverteilungen, wie sie beispielsweise in der Verkehrszeichenerkennung angewendet wird (siehe Abschnitt 3.5). Die zweifache Intensitätsfilterung kann jedoch nicht angewendet werden, da für die Extraktion der Kennzeichenintensitäten mithilfe des Gaußschen Mischmodells die Anzahl der Verteilungen bekannt sein muss. Diese variiert jedoch, da es je nach Fahrzeug neben der obligatorischen Karosserie, den Rückstrahlern und dem Kennzeichen optional unlackierte Kunststoffelemente gibt, die eine eigene Intensitätsverteilungskurve erzeugen. Aus diesem Grund wird eine einfache Intensitätsfilterung mit festem Schwellwert angewendet. Da Retroreflektoren die höchsten Intensitätswerte hervorrufen kann auf einen oberen Grenzwert verzichtet werden. Anhand des unteren Schwellwertes wird die Punktwolke in Punkte hoher und niedriger Intensität geteilt. Eine Veränderung des Mindestwertes führt zu einer veränderten Punktzahl in beiden Punktmengen. Für die Ermittlung einer Intensitätsschwelle für alle betrachteten Laserscanner wurde der Schwellwert stückweise variiert und analysiert, welche Objektklassen in dem Anteil hoher Intensitäten existieren. Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 4.3: Ermittlung des Intensitätsschwellwertes, orange: gewählter Intensitätsmindestwert

Mindestwert der Intensität	Objektklassen				
	Kennzeichen	Rückstrahler	Karosserie	Verkehrszeichen	Leitplanke
110/255					
120/255					
130/255					
140/255					
150/255					
160/255					
170/255					
180/255					
190/255					

Die aufgelisteten Objekte sind die Gegenstände **in der**, die aufgrund ihrer Oberfläche ein hohes bis sehr hohes Reflexionsvermögen besitzen. Die Entfernungsabhängigkeit ist in dieser Untersuchung von geringer Relevanz, da sich die Gegenstände im Beobachtungsbereich des CropBox-Filters befinden, weshalb die Unterschiede der Objektabstände eingegrenzt werden. Die gemessene Bestrahlungsstärke der Reflexionen an Objekten ohne Retroreflexeigenschaften hängt zudem vom Strahleinfallswinkel ab (siehe Gleichung 2.4). In der Tabelle 4.3 soll daher lediglich eine Tendenz dargestellt werden: Die Breite des Dreiecks ist ein Referenzwert für den Anteil stark reflektierender Punkte bezüglich der Gesamtanzahl der Messpunkte auf diesem Gegenstand. An der unteren Spitze der Dreiecke sind kaum noch hochreflektive Punkte auf dem entsprechenden Objekt vorhanden. Die leeren Tabellenzellen sagen demnach aus, dass keiner der Objektpunkte die Mindestanforderung der Bestrahlungsstärke erfüllt.

Aus der Tabelle 4.3 geht hervor, dass die Verkehrszeichen mithilfe einer einfachen Intensitätsfilterung nicht herausgefiltert werden können. Dies resultiert aus der höheren Reflexionsklasse (siehe Abschnitt 2.5.4). Um die Retroreflektoren von den anderen aufgelisteten Objekten zu trennen, wäre eine Intensitätsschwelle von mindestens 170/255 erforderlich. Allerdings sind mit dieser Parametrierung kaum auswertbare hochreflektive Messpunkte auf den Nummernschildern vorhanden, was an der geringen lokalen Dreiecksbreite erkennbar ist. Des Weiteren variieren die Messwerte der Bestrahlungsstärke zwischen den Sensortypen (siehe Abschnitt 2.3.2) bei Betrachtung desselben Objekts. Fer-

ner schwankt die Bestrahlungsstärke von Retroreflektoren durch den Einfluss verschiedener Umwelteinflüsse. Um unter jeglichen Bedingungen trotzdem alle Kennzeichen einzuschließen, wird der Schwellwert auf einen Grenzwert von $130/255$ gesetzt. Mit dieser Konfiguration ist es dennoch möglich, das Nummernschild von der Karosserie zu trennen.

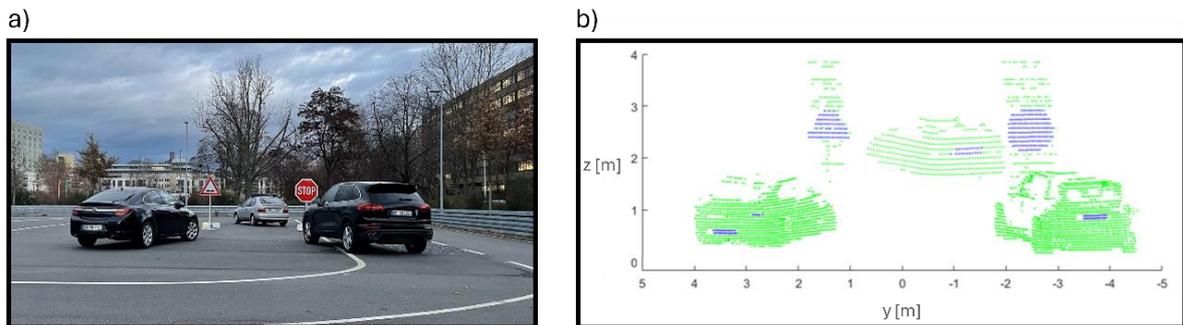


Abbildung 4.4: Intensitätsfilterung, a) Kamerabild, b) hochreflektive Messpunkte (blau)
(Bsp.: Leishen LS128S2)

In Abbildung 4.4 ist ein statisches Szenario mit Fahrzeugen, Verkehrszeichen und Leitplanke dargestellt. Die Bestrahlungsstärke der blau markierten Punkte liegt oberhalb des Intensitätsschwellwertes. Es existieren in dem hoch reflektivem Punktmenge zwar neben Kennzeichen weitere Objekte, doch ein höherer Mindestwert würde eine geringere Punktzahl pro Kennzeichen bedeuten. Für weitere Betrachtungen der Form oder der Größe, ist es allerdings von Vorteil, möglichst alle Messpunkte zu verwenden, die vom Kennzeichen reflektiert wurden. Ein kleinerer Mindestwert würde bedeuten, dass die anschließende Filterung anhand der Segmenteigenschaften rechenintensiver wird, da mehr Bereiche als potenzielle Kennzeichen in Frage kommen. Die Intensitätsuntersuchungen haben ergeben, dass für die sichere Erkennung von Fahrzeugkennzeichen weitere Filter implementiert werden müssen.

4.2.4 Dichtebasierte Clusterung

Die Punkte, die sich in dem Beobachtungsgebiet befinden und eine hohe Reflektivität aufweisen, werden anschließend Punkthäufungen (Cluster/ Segmente) zugeordnet. Hierbei gilt es, eine universelle Methode zu finden, die auch in anderen Programmiersprachen implementiert werden kann. Die DBSCAN-Segmentierung ist eine verbreitete Lösung, die auch in der vorgestellten Verkehrszeichenerkennung (siehe Abschnitt 3.5) zur Anwendung kommt. Diese kann ebenso für die Kennzeichenerkennung genutzt werden. Die Komplexität der Berechnungsschritte, welche die Punktabstände und Segmentmittel- sowie Segmentrandpunkte ermitteln, verursachen jedoch eine mittlere bis hohe Verarbeitungsdauer. Die vorangegangene Intensitätsfilterung sorgt dafür, dass nur noch wenige Punkte (siehe Abbildung 4.4, blau markiert) segmentiert werden müssen und die Abstände zwischen den hochreflektiven Flächen relativ groß sind. Aus dieser günstigen Ausgangslage entsteht der Anspruch, eine vereinfachte Methodik zu entwickeln, die die relevanten Punkte

schneller in Cluster ordnet als herkömmliche Segmentierungsalgorithmen mit aufwendigeren Berechnungen.

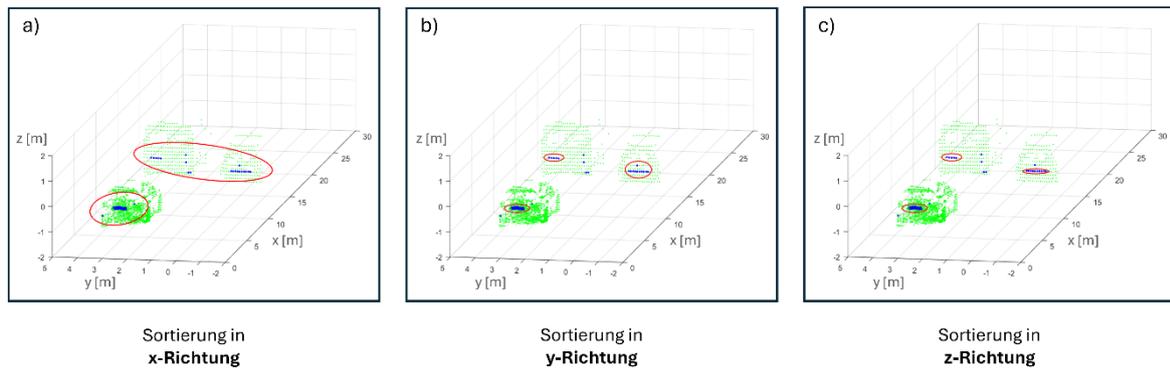


Abbildung 4.5: stufenweise Segmentierung (Bsp.: Ouster OS1)

Abbildung 4.5 zeigt die Vorgehensweise des selbst entwickelten Clustering-Algorithmus, der sich in drei Stufen einteilen lässt. Zuerst werden alle gefilterten Punkte nach ihrem longitudinalen Abstand zum Lidar geordnet. Somit kann der Differenzwert der x-Koordinaten der aufeinanderfolgenden Punkte berechnet werden. Die geordneten Messpunkte werden einem Segment zugeordnet, wenn der Abstand zum vorherigen Punkt unterhalb eines Schwellwertes liegt. Überschreitet die Differenz einen festgelegten Wert, wird ein neues Segment initialisiert. Die Funktion gibt demnach potenzielle Cluster zurück, die in ihrer Größe, Form und ihrer Anzahl variieren dürfen. Je Segment müssen mindestens drei Punkte vorhanden sein, um von einer Punkthäufung auszugehen. Die Angabe der Mindestpunktanzahl wurde parametrisch implementiert, sodass dieser Wert bei Bedarf angepasst werden kann. Diese erste Stufe der Segmentierung kann mithilfe eines empirischen Schwellwertes ($\Delta x_{max} = 1 \text{ m}$) durchgeführt werden. Die exakte Herleitung des zulässigen Differenzwertes in x-Richtung ist nicht notwendig, da die Kennzeichen laut gesetzlichen Vorgaben an dem Fahrzeugheck und der Fahrzeugfront zu montieren sind. Daher weisen einzelne Kennzeichen innerhalb einer Punktwolke nur dann ähnliche x-Koordinaten auf, wenn die Fahrzeuge sich nebeneinander befinden (siehe Abbildung 4.5, a). Neben diesem Sonderfall ist es mit der ersten Segmentierungsstufe nicht möglich, Rückstrahler oder andere hochreflektive Punkte, die an demselben Fahrzeug vorzufinden sind, von dem Kennzeichen zu trennen. Dies resultiert aus den kleinen Differenzen der x-Koordinaten, die auch für starke Schrägstellungen des Zielobjekts unterhalb des Schwellwertes liegen. Folglich schließt sich die Filterung anhand der Differenzen der y-Koordinaten an (siehe Abbildung 4.5, b). Hierbei werden die Punkte jedes Segments anhand ihrer y-Werte aufsteigend sortiert und anschließend die Differenzen der y-Koordinaten der aufeinanderfolgenden Punkte berechnet. Gibt es innerhalb eines Segmentes einen Differenzwert, welcher oberhalb einer definierten Schwelle liegt, wird das Cluster an dieser Stelle getrennt. Aus einem Segment werden demnach zwei oder mehrere Segmente erzeugt. In

der Abbildung 4.5 (b) ist zu beispielsweise zu erkennen, dass die starken Reflexionen der beiden vorderen Fahrzeuge voneinander separiert wurden. Zudem konnten die Rauschpunkte aus dem Cluster des nahen Fahrzeugs aufgrund des hohen y-Abstandes entfernt werden.

Der dritte Schritt des Segmentierungsalgorithmus wird mit der Sortierung anhand der z-Dimension eingeleitet. Analog zu den vorangegangenen beiden Sequenzen werden die Differenzen der aufeinanderfolgenden z-Koordinaten eines Segments gebildet. Beim Überschreiten des maximal zulässigen Δz -Wertes, wird ein neues Segment initialisiert.

Die geometrische Herleitung der Schwellwerte für die Differenz der y- beziehungsweise z-Koordinaten befindet sich in der Anlage C). Der finale Clusteralgorithmus wurde mit dem Dateinamen *sortClustering.m* versehen.

4.2.5 Größenfilterung

Im Anschluss an die Clustering erfolgt die Filterung der segmentierten Punkte anhand der Segmentgröße. Hierbei werden den gesetzlich zulässigen Abmessungen von amtlichen Kennzeichen (siehe Abschnitt 2.5.2) geringe Toleranzbereiche hinzugefügt. Ein Segment wird dann als mögliches Kennzeichen klassifiziert, wenn es entweder den Abmessungen der Gruppe 1 oder denen der Gruppe 2 zugeordnet werden kann. Die Breite und Höhe werden mithilfe der euklidischen Abstände zwischen den äußeren Punkten gebildet.

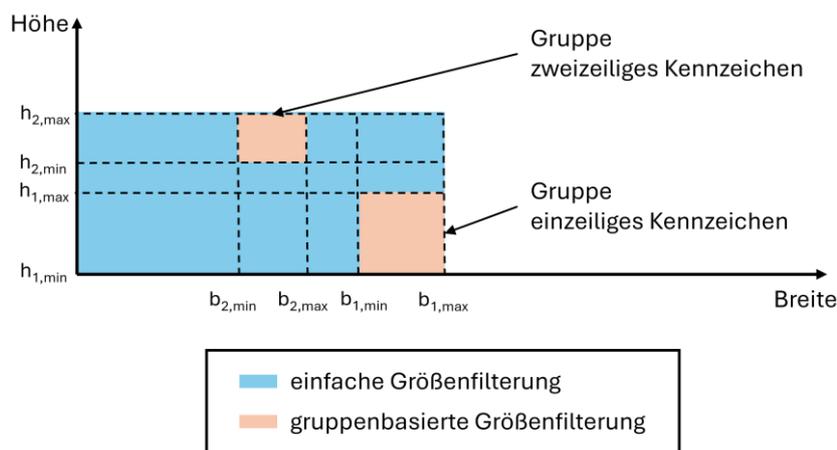


Abbildung 4.6: gruppenbasierte Größenfilterung

In der Abbildung 4.6 ist ersichtlich, dass bei der Gruppeneinordnung vier Höhen- und vier Breitengrenzen definiert werden. Die Höhengrenze $h_{1,min}$ für die einzeiligen Kennzeichen wird null gesetzt, da mit steigender Entfernung die Wahrscheinlichkeit zunimmt, dass sich bei den Mehrzeilenscannern nur eine Punktzeile auf dem Kennzeichen befindet. In diesem Fall würde die Höhe gegen null streben. Sowohl mit der einfachen als auch mit der gruppenbasierten Größenfilterung werden Segmente aussortiert, die zu schmal, zu breit oder zu hoch sind. Durch die Einordnung in Gruppen können darüber hinaus Cluster, die auf-

grund ihrer Abmessungen in den blau markierten Bereich fallen, ausgesondert werden. Dank dieser Methodik kann die Anzahl der Fehldetektionen von Schildern und Aufklebern minimiert werden.

4.2.6 Form- und Intensitätsbasierte Clusterung

Mithilfe der vorangegangenen dichte-basierten Clusterung konnten Punkthäufungen, die sich aufgrund ihres Abstands voneinander unterscheiden, getrennt werden. Gleichzeitig gelang mithilfe der Definition der Mindestpunktzahl pro Cluster die Entfernung von Ausreißern. In vielen Fällen sorgen allerdings nah am Kennzeichen befindliche Rückstrahler oder ähnliche hochreflektive Elemente dafür, dass diese mit keiner Segmentierungslogik voneinander getrennt werden können. Da dieses Problem zusätzlich für nahezu jedes Fahrzeugheck ab einer Entfernung von rund 20 m eintritt, wurde eine weiche Clustermethodik entwickelt, die es ermöglicht, innerhalb des Betrachtungsgebiets nahezu alle Nummernschilder zu erkennen.

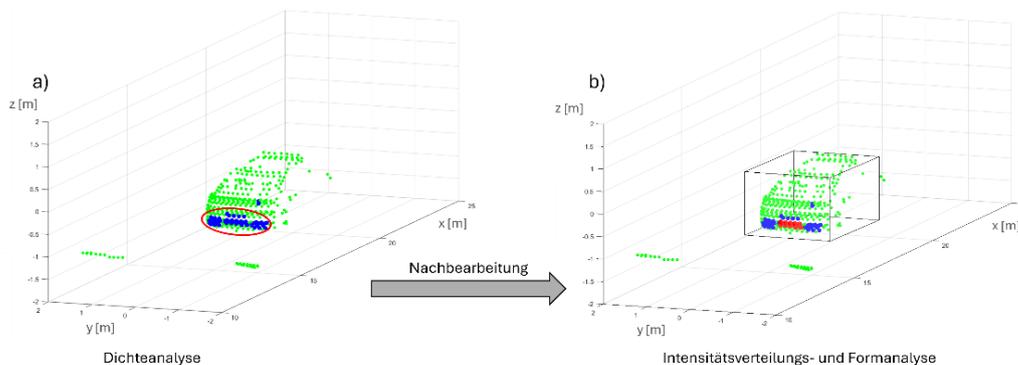


Abbildung 4.7: Nachbearbeitung durch Intensitätsverteilungs- und Formanalyse (Bsp.: Leishen LS128S2)

Abbildung 4.7 verweist exemplarisch auf eine Punktwolke, bei der die dichte-basierte Clusterung keine Trennung des Kennzeichens von den Rückstrahlern vornimmt (a). Dieses Segment, wurde aufgrund der Dimensionen bei der Größenfilterung aussortiert. Für solche Segmente, die größer sind als Kennzeichen, schließt sich eine Nachbearbeitung an. Das primäre Ziel ist die Trennung der Rückstrahler und des Kennzeichens, weshalb im Folgenden ausschließlich das Fahrzeugheck betrachtet wird. Für die Segmentierung des Nummernschilds an der Fahrzeugfront ist in der Regel die dichte-basierte Clusterung, die in Abschnitt 4.2.4 beschrieben wurde, ausreichend.

In der weiche Clustermethode werden zwei grundlegende Untersuchungen durchgeführt:

- **Formanalyse:** Der Algorithmus sucht am Fahrzeugheck ein Rechteck, welches sich möglichst gut an die darin liegenden Messpunkte anpasst
- **Intensitätsverteilungsanalyse:** Innerhalb des Rechtecks soll eine möglichst homogene Intensitätsverteilung herrschen. Punktgruppen, die diese Bedingungen am besten erfüllen, werden final als Cluster ausgewählt.

Für die Formanalyse wird schrittweise ein Rechteck, welches die Dimensionen eines einzeiligen Kennzeichens aufweist, im Cluster verschoben. Da das Kennzeichen und die Rückstrahler in erster Näherung eine Ebene darstellen, werden die Messpunkte des Clusters in die y-z-Ebene projiziert. Die tatsächliche Kennzeichenbreite $b_{tats.}$ weicht für schräge Anleuchtungen von der Breite $b_{opt.}$, die in der Projektion gemessen werden kann, ab. Um eine aufwendige Transformation zu umgehen, muss folglich die Rechteckgröße an die scheinbare Größe des Kennzeichens angepasst werden.

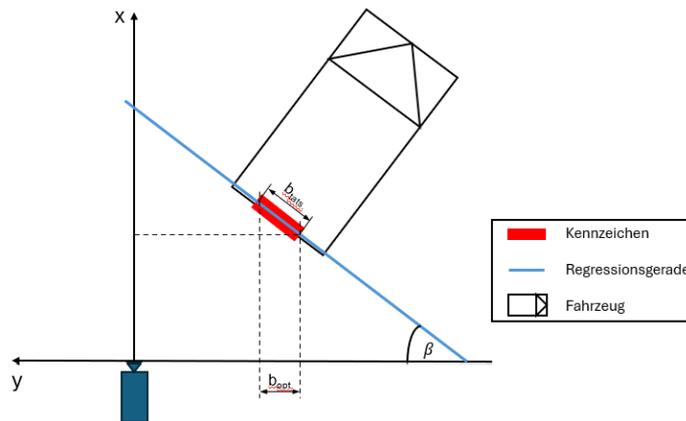


Abbildung 4.8: geometrische Herleitung der optischen Breite des Kennzeichens (Draufsicht, x-y-Ebene)

Abbildung 4.8 zeigt die geometrische Herleitung für die Berechnung der optischen Kennzeichenbreite. Die verzerrte, in der Projektion sichtbare, Kennzeichenbreite $b_{op.}$ kann in Abhängigkeit der Kennzeichenschrägstellung ausgedrückt werden. Es gilt:

$$b_{opt.} = b_{tats.} * \cos \beta \quad (4.4)$$

Der Winkel β wird von der Regressionsgeraden und der Sensorquerachse eingeschlossen. Für die Erstellung der Geradenanpassung an die Kennzeichenpunkte wird im ersten Schritt das Cluster in die x-y Ebene projiziert. Danach schließt sich die Kalkulation einer Regressionsgerade mithilfe des Matlab-Befehls `polyfit(y,x,1)` an. Diese Funktion gibt als Ergebnis den Anstieg m der Geraden aus. Um Rechenzeit zu sparen, wird darauf verzichtet, aus dem Anstieg den Winkel β zu berechnen. Stattdessen kann die Beziehung

$$\tan(\beta) = m$$

in die Gleichung 2.1 eingesetzt und anschließend vereinfacht werden. Somit lässt sich folgende finale Gleichung formulieren:

$$b_{opt.} = \frac{b_{tats.}}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (4.5)$$

Mit der ermittelten scheinbaren Kennzeichenbreite $b_{opt.}$, die für die Schrägstellung der Clusterebene zu erwarten ist, kann schließlich die rechteckförmige zweidimensionale ROI über den gesamten Bereich des Clusters verschoben werden.

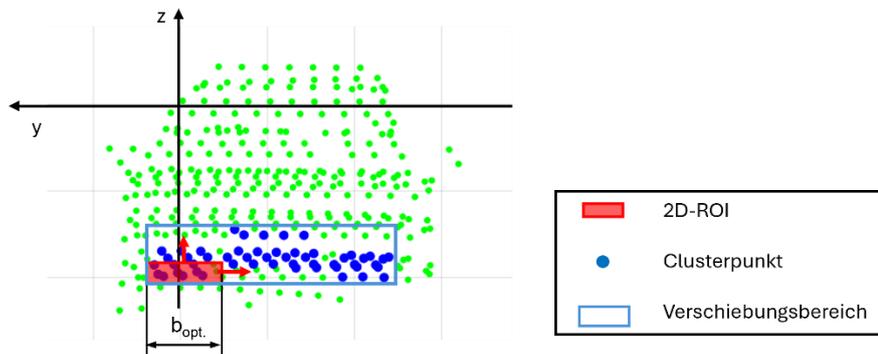


Abbildung 4.9: Verschiebungsbereich des Rechtecks in der y-z-Ebene (Bsp.: Livox Horizon)

Abbildung 4.9 zeigt das in die y-z- Ebene projizierte Cluster (blau), in dem die Punkte gesucht werden, die am wahrscheinlichsten dem Kennzeichen zuzuordnen sind. Dazu wird für jede Position der ROI die Punktzahl und die Standardabweichung der Bestrahlungsstärkewerte innerhalb des Rechtecks abgespeichert. Die Zuordnung zur jeweiligen ROI-Position erfolgt anhand der y- und z-Koordinate des Rechteckmittelpunktes. Nach dem Scannen des Clusters werden die abgespeicherten Größen bewertet.

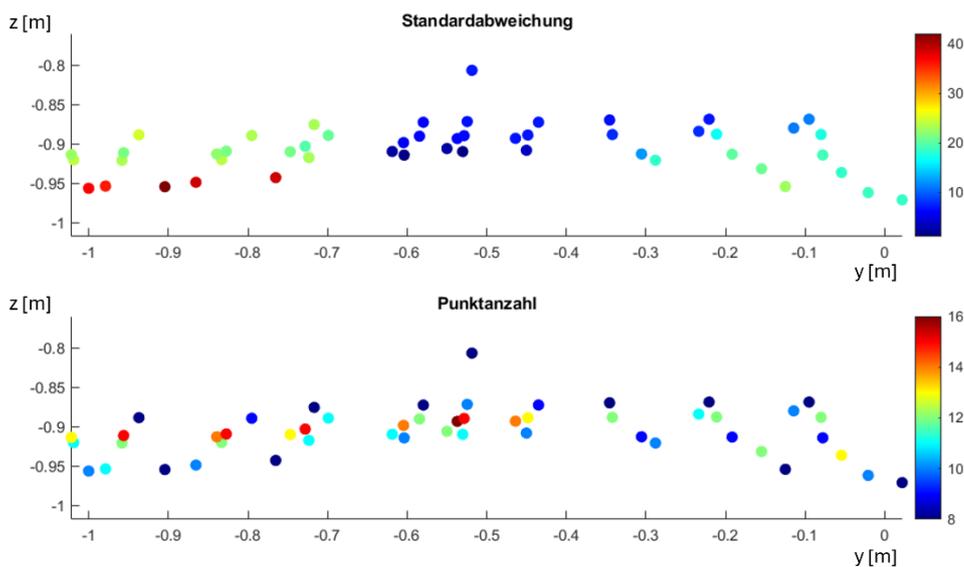


Abbildung 4.10: Bewertung der Messgrößen anhand der Standardabweichung und der Punktzahl

In der Abbildung 4.10 sind die Rechteckmittelpunkte für jede Position dargestellt, in der sich mindestens ein Messpunkt in der ROI befand. Anhand der untersuchten Messgröße wurden die Rechteckmittelpunkte farbig markiert. Die Diagrammachsen sind an die scheinbaren Abmessungen des Verschiebungsbereichs angepasst. Bei der Auswertung der Standardabweichung (oberes Diagramm) treten die minimalen Werte, welche blau gekennzeichnet sind, im mittleren Bereich auf. Dort befindet sich am realen Fahrzeug das Kennzeichen. Das bedeutet, dass Nummernschilder aufgrund ihrer ebenen einfarbigen Reflexfolie nur kleine Intensitätsstreuungen innerhalb eines Frames aufweisen. Darüber hinaus ist für das Areal des Kennzeichens eine hohe Punktzahl innerhalb der ROI zu

erwarten, da die Messpunkte des Kennzeichens und die zweidimensionale ROI die gleiche Form und die gleichen Abmessungen aufweisen. Die Punktzahl wird daher als Kriterium für die Güte der Formanpassung verwendet. Im unteren Diagramm (siehe Abbildung 4.10) ist die hohe Punktzahl im Bereich des Kennzeichens an der gelben bis rötlichen Färbung zu erkennen ist. Dennoch gibt es in anderen Bereichen vereinzelte Mittelpunkte, die ähnlich koloriert sind. Aus diesem Grund wird im Anschluss der Mittelpunkt gesucht, für den sowohl eine kleine Standardabweichung als auch eine hohe Punktzahl abgespeichert wurde. Hierbei kommt die Multikriterielle Entscheidungsanalyse zur Anwendung: Um beide Kriterien bei der Wahl des besten Mittelpunktes zu berücksichtigen, wird für jeden Mittelpunkt mit dem Index i eine Gesamtbewertung G_i berechnet.

$$G_i = \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_{max}} + \frac{n_i}{n_{max}} \right) \quad (4.6)$$

Aus der Gleichung 4.6 ist zu entnehmen, dass der Wert der Standardabweichung σ_i sowie die ermittelte Punktzahl n_i des Rechtecks i auf den globalen Maximalwert bezogen werden. Dadurch wird zum einen die Einheit eliminiert und zum anderen der Einfluss unterschiedlicher Größendimensionen minimiert, sodass beide Kriterien äquivalent gewichtet werden. Um eine sinnvolle Gesamtbewertung zu ermitteln, wird der Bewertungsmaßstab der Standardabweichung invertiert. Das bedeutet, dass eine kleine Standardabweichung eine hohe Bewertung erzielt. Die finale Halbierung der Summe ist nicht zwingend erforderlich, erleichtert jedoch die Einschätzung der Gesamtbewertung G_i , da die Ergebnisse dadurch im Bereich von $0 \leq G_i \leq 1$ liegen. $G_i = 1$ stellt die Bestbewertung dar.

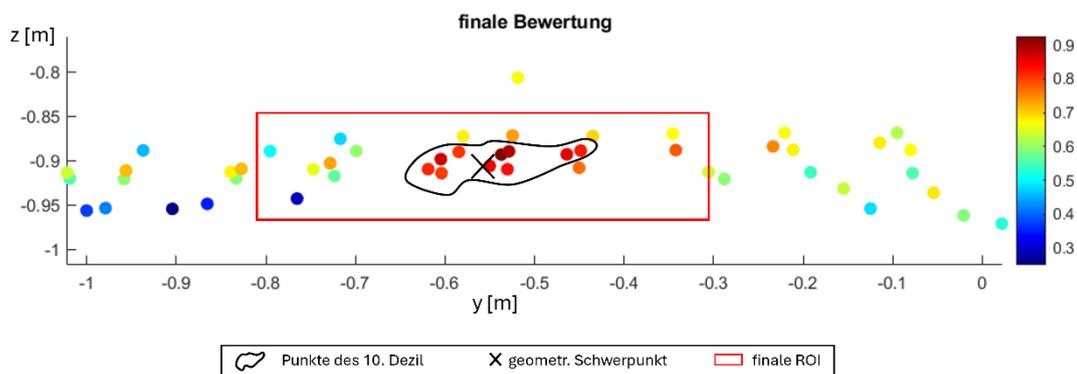


Abbildung 4.11: finale Bewertung der Mittelpunkte

Abbildung 4.11 zeigt das Ergebnis der multikriteriellen Entscheidungsanalyse. Die Rechteckmittelpunkte mit den besten Werten befinden sich im Bereich des Kennzeichens. Im nächsten Schritt würde die Selektion der Reflexionspunkte, die in dem Gebiet um den Mittelpunkt mit der besten Bewertung liegen, erfolgen. Die Auswahl des Mittelpunkts mit dem besten Resultat hat sich jedoch als nicht robust genug bewiesen. Daher werden 10 % aller Mittelpunkte ausgewählt, welche die besten Bewertungen erzielt haben (zehntes Dezil). Aus den Koordinaten der Mittelpunkte des zehnten Dezils wird schließlich der geometrische

Schwerpunkt berechnet. Dieser gibt die Position der finalen ROI an, die die Reflexionspunkte segmentiert, welche zum Kennzeichen gehören. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.7 (b) ersichtlich. Die im Datenträger befindliche Datei *IntDistributionClustering.m* enthält den entsprechenden Programmcode für die erläuterte Form- und Intensitätsverteilungsanalyse.

Es wurde festgestellt, dass durch die beschriebenen Verarbeitungsschritte nahezu alle Kennzeichen aus den Punktwolken sicher extrahiert werden konnten. Allerdings werden weitere Objekte als Kennzeichen klassifiziert, wie beispielsweise Zusatz-Verkehrsschilder oder Fahrzeugrückstrahler, die ähnliche Dimensionen und Reflexionswerte aufweisen und sich im Beobachtungsgebiet befinden.

Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt das Trägerobjekt untersucht.

4.2.7 Segmentierung des Trägerobjekts

Ziel dieser Analyse ist es, Schilder, die von der Position, deren Abmessungen und Form nicht von Kennzeichen zu unterscheiden sind anhand des Trägerobjekts auszusortieren.

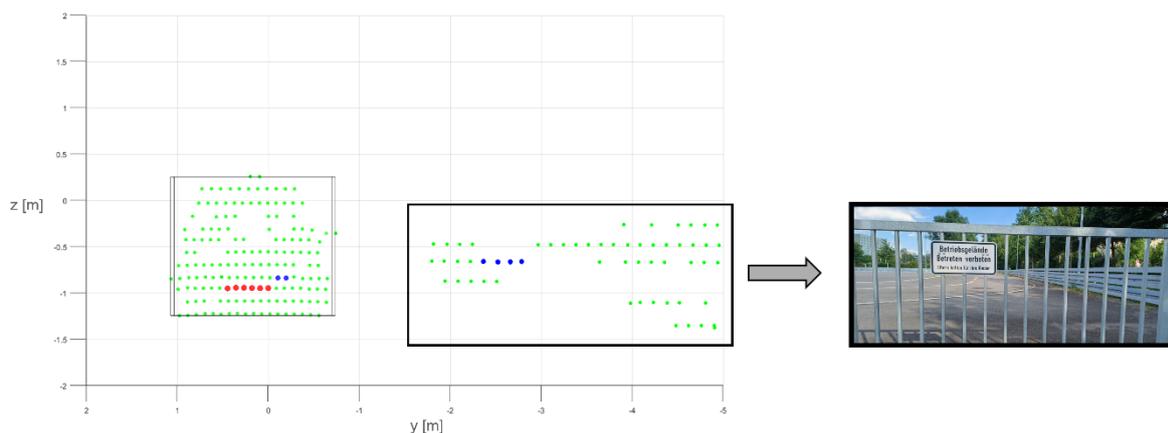


Abbildung 4.12: Schild am Zaun als potenzielles Kennzeichen (Bsp.: Ouster OS1)

Abbildung 4.12 zeigt ein beispielhaftes Schild, welches ähnliche Abmessungen und Reflektivitätseigenschaften wie Kennzeichen aufweist. Eine Fehldetektion kann verhindert werden, in dem das Objekt, an dem das Schild montiert ist, untersucht wird. Hierbei wird das Merkmal genutzt, dass Kennzeichen ausschließlich an Fahrzeugen angebracht sind. Somit können Schilder, die beispielsweise an Zäunen, Pfosten oder Gebäuden montiert sind, aufgrund der Abmessungen des Trägerobjekts aussortiert werden. Ähnlich der Filterung anhand der Kennzeichenabmessung kann ebenso für die Trägerobjekte eine gruppenbasierte Größenfilterung durchgeführt werden. Fahrzeuge werden vereinfacht in die Gruppen Zweirad, Pkw und Lkw gegliedert. Für jede Gruppe wird ein zulässiger Breiten- und Höhenbereich festgelegt. Die Länge des Trägerobjekts wird nicht vermessen. Denn für Zielfahrzeuge in der Nähe der optischen Sensorachse, die parallel zu dieser ausgerichtet sind, kann die Objektlänge nicht erfasst werden. Um die Höhe und die Breite des Trägerob-

jekts berechnen zu können, ist vorerst eine Segmentierung des relevanten Gegenstandes erforderlich. Es ist bekannt, dass das gesuchte Objekt direkten Kontakt mit dem Kennzeichen haben muss und sich aus der Sicht des LiDAR-Sensors hinter dem Nummernschild befindet. Daher ist die approximative Position des Objektes bekannt.

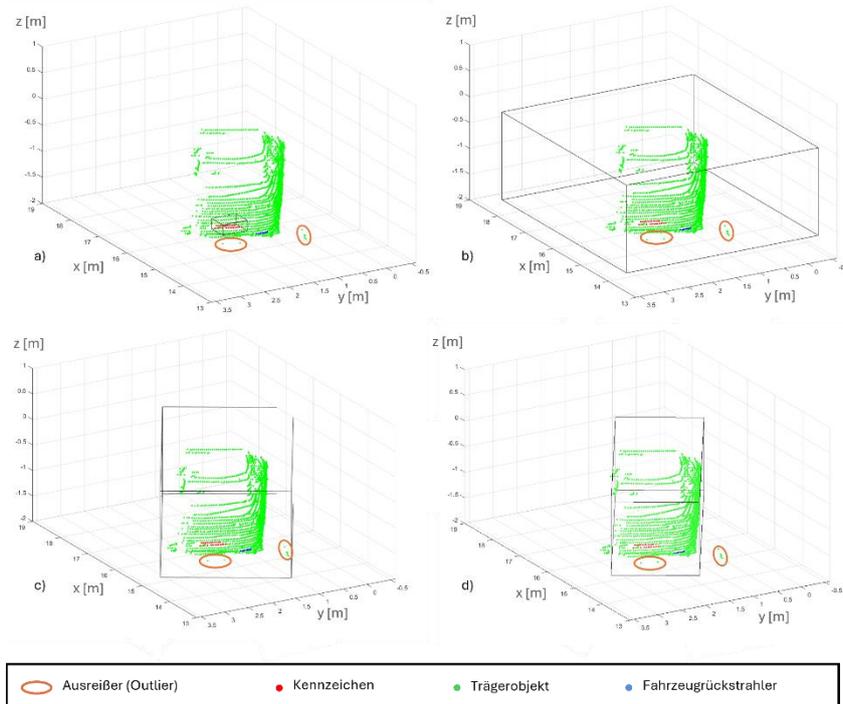


Abbildung 4.13: Segmentierung des Trägerobjekts (Bsp.: Leishen LS128S2)

Die Abbildung 4.13 fasst die vier Teilschritte der Segmentierung des Trägerfahrzeugs zusammen. Zuerst erfolgt die Initialisierung des quaderförmigen Beobachtungsbereichs mit den Positionsdaten des Kennzeichens (a). Anschließend wird der Positionsmatrix $C_{Kennz.}$, die die sechs Koordinatenextremwerte enthält, mehrfach eine Matrix $C_{Expand.}$ hinzuaddiert, sodass der durch die Ergebnismatrix $C_{result.}$ Beschriebene Raum, gegenüber der Eingangsmatrix C_{Kennz} wächst.

$$C_{Kennz.} + n * C_{Expand.} = C_{result.}$$

Nach jeder Addition wird ein CropBox-Filter auf den neuen Quader angewendet. Die Additionsschleife endet, wenn durch die letzte Iteration kaum noch Punkte hinzukamen. Das Berechnungsverfahren geht dann davon aus, dass in dem finalen Quader $C_{result.}$ alle Punkte des Trägerobjekts einschließlich des Kennzeichens enthalten sind (b). Der Beobachtungsbereich wird hierbei in jeder Dimension nacheinander erweitert. Im nächsten Schritt können alle Punkte im Quader segmentiert werden. Würden die Fahrzeuge parallel oder orthogonal zur Laserachse ausgerichtet sein, könnte aus den äußeren Punkten direkt die Abmessung berechnet werden. Allerdings weichen die realen Ausrichtungen häufig davon ab. Daher wird anschließend mit der Matlab-Funktion *pcfitcuboid* ein Quader erzeugt, der alle Punkte des Trägerfahrzeugs enthält und sich an die Schrägstellung des Fahrzeugs anpasst (c).

Allerdings verfälschen Ausreißer (engl. *Outlier*) die berechneten Abmessungen eines Fahrzeugs. Daher müssen diese aus dem segmentierten Fahrzeug entfernt werden. Es ist in der Regel üblich, Ausreißer zu identifizieren, indem für jeden Punkt die benachbarten Punkte gezählt werden, die innerhalb eines definierten Umkreises liegen (engl. *Radius Outlier Removal*). Des Weiteren existiert eine statistische Methode, mit der die Abstandswerte benachbarter Punkte ausgewertet werden (engl. *Statistical Outlier Removal*). Diese Filter benötigen für die große Punktzahl des Trägerobjekts viel Rechenleistung. Daher wird eine alternative Filtermethode verwendet, um Ausreißer zu entfernen. Hierbei wird die Erkenntnis genutzt, dass nur Ausreißer im äußeren Bereich des Fahrzeugs für die Abmessungen relevant sind. Daher werden die Quaderaußenflächen in festgelegten Schrittweiten zusammengeschoben und somit das Volumen des schrägen Beobachtungsbereiches, in welchem das Trägerfahrzeug liegt, stückweise verkleinert. Die rechte, linke und obere Fläche werden dabei nacheinander verschoben. Eine Verschiebung der Stirnflächen ist nicht erforderlich, da die Längenmessung des Fahrzeugs nicht für die Größenfilterung benötigt wird. Die untere Fläche des Quaders wird nicht nach oben verschoben, da die Trägerobjekte in der Regel entweder am Boden montiert sind oder auf diesem stehen. Nach jeder Veränderung des Volumenkörpers wird die Anzahl der durch die Verkleinerung ausgeschlossenen Punkte berechnet. Diese ist gleich der Differenz aus den innenliegenden Punkten des aktuellen und des vorhergehenden Körpervolumens. Die Anzahl der im Quader befindlichen Messpunkte wird mit dem Matlab-Befehl *findPointsInsideCuboid* ermittelt. Die Quaderfläche wird so lange verschoben, bis die Anzahl der durch die aktuelle Verschiebung ausgeschlossenen Punkte einen Schwellwert übertrifft. In diesem Fall geht das Programm davon aus, dass durch die gegenwärtige Verschiebung keine Ausreißer mehr, sondern zum Fahrzeug gehörende Punkte aussortiert wurden. Hiermit ist die Verlagerung der entsprechenden Fläche beendet und die Verschiebung der nächsten Fläche beginnt.

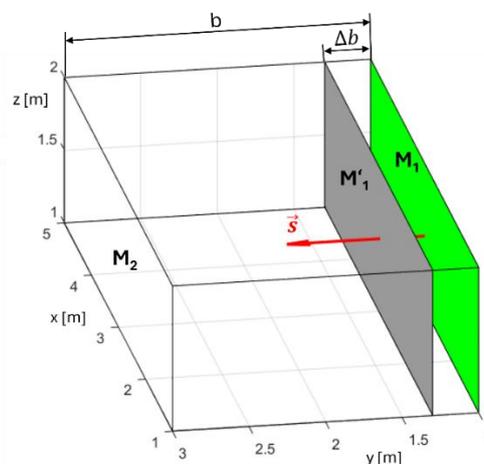


Abbildung 4.14: Volumenminimierung des Quaders am Beispiel einer Seitenfläche

In Abbildung 4.14 ist die Verschiebung einer ausgewählten Seitenfläche dargestellt. Um die Ausrichtung des Körpers und die Parallelität der Außenflächen beizubehalten werden die Verschiebungsvektoren \vec{s} der drei Seiten mit

$$\vec{s} = \frac{M_2 - M_1}{b}$$

berechnet, wobei M_1 die Koordinaten der vier Eckpunkte der zu verschiebenden Fläche und M_2 die der gegenüberliegenden Fläche beinhaltet. Die Eckpunkte des Volumenkörpers können mit der Matlab-Funktion *getCornerPoints* extrahiert werden. Mithilfe der Division durch die Quaderbreite b , wird der Verschiebungsvektor normiert. Seine Länge beträgt demnach 1 m . Für die um den Weg Δb verschobene Seitenfläche M'_1 gilt:

$$M'_1 = M_1 + \vec{s} * \Delta b$$

Nun kann sicher die Breite und Höhe des Trägerobjekts bestimmt werden, da die Messabweichungen, die aus den Ausreißerpunkten resultierten, eliminiert wurden. Die entsprechende Software *outlierRemoval.m* ist im Datenträger zu finden.

Es schließt sich eine gruppenbasierte Größenfilterung an, sodass als Nebenprodukt der Kennzeichenerkennung, auch die dazugehörigen Fahrzeuge segmentiert und klassifiziert werden. Der erläuterte Algorithmus ist unter der Dateibezeichnung *vehicleSegmentation.m* zu finden.

Die Größenfilterung von Motorrädern, stellt eine besondere Herausforderung dar. Denn die Höhe und die Breite werden sowohl durch das Fahrzeug als auch durch den Aufsassen bestimmt. Die zulässigen Höhentoleranzen eines Zweirads werden daher durch zwei Variationen erzeugt. Die Erste resultiert aus den verschiedenen Sitzhöhen von Krafträdern, die in der Regel zwischen 65 und 85 cm variiert [20]. Kleinkrafträder werden von der Kennzeichenerkennung ausgeschlossen, da ihr Nummernschild schon in kleiner Entfernung aufgrund der geringen Größe für den Laserscanner kaum erkennbar ist.

Der Sitzhöhe wird die Höhe sitzenden durchschnittlichen Erwachsenen hinzuaddiert. Dabei werden die Perzentile verwendet, die jeweils den Extremwert repräsentieren. Der Maximalwert wird an dem 95. Perzentil der männlichen Bevölkerung orientiert

[21]. Diese Zielgruppe misst im Sitzen rund 97 cm oder weniger. Der Maximalwert für die Höhe von Zweirädern beträgt demnach:

$$h_{max} = 85\text{ cm} + 97\text{ cm} = 182\text{ cm}$$

Der Minimalwert wird erreicht, wenn sich kein Aufsasse auf dem Zweirad mit geringer Sitzhöhe befindet:

$$h_{min} = 65 \text{ cm}$$

Ferner weisen geparkte Zweiräder einen großen Wankwinkel auf, weshalb der Boxing-Algorithmus, mit dem die Abmessungen des Fahrzeugs berechnet werden, die Breite zu groß einschätzt. Die Lösung kann mit einem vertretbaren Rechenaufwand gelöst werden, indem den Schwellwerten für die zulässige Breite der Fahrzeugklasse der Zweiräder Toleranzen hinzugefügt werden. Für diesen Fall wird die Maximalbreite auf $1,3 \text{ m}$ gesetzt. Der Wankwinkel sorgt zwar für eine Reduzierung der Sitzhöhe. Allerdings erscheint das Zweirad nicht niedriger, da das äußere Lenkerende in der Parkstellung den höchsten Punkt bildet. Eine weitere Schwäche der Anpassung des Quaders wird in folgender Grafik deutlich.

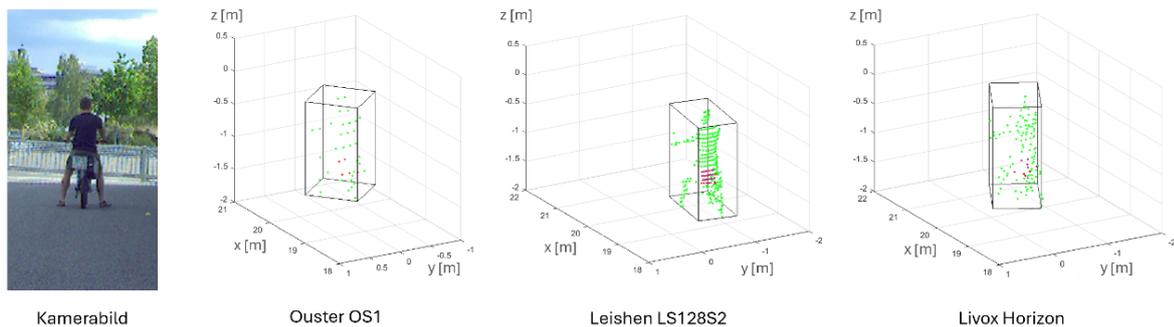


Abbildung 4.15: Anpassung des Quaders an Punktwolke des Kleinkraftrades

In der Abbildung 4.15 ist zu sehen, dass die Ausrichtung des Quaders häufig von der tatsächlichen Schrägstellung des Zweirads abweicht. Das liegt daran, dass die Silhouette zum Hinterrad spitz zuläuft und die maximale Breite am Lenker erreicht wird. Dies trifft allerdings nicht auf Personen- und Lastkraftwagen zu, da der Quader an die entsprechende Silhouette aufgrund ihrer orthogonal zueinander ausgerichteten Außenkanten mit jedem Sensor korrekt angenähert wird. Eine Ausrichtung des schwarzen Volumenkörpers anhand des Kennzeichens ist nur zielführend, wenn die Normale der Kennzeichenebene sicher ermittelt werden kann. Aufgrund der großen Streuung der Punkte bei der Messung mit dem Ouster OS1 beziehungsweise dem Livox Horizon ist diese Methode jedoch nicht zielführend. Aus diesem Grund wird der Fehler bei der Größenberechnung von Zweirädern hingenommen und durch den großen Toleranzbereich der Breite ($0,5 \text{ m} \leq b \leq 1,5 \text{ m}$) kompensiert.

Eine weitere Herausforderung bei der Klassifizierung von Krafträdern entsteht durch den Nickwinkel des Blechschildes. Durch die scheinbar geringere Höhe kann schon in kurzer Distanz, die Erkennung erschwert werden. Wird das Kennzeichen doch wahrgenommen, ermittelt die Höhen- und Breitenberechnung des Kennzeichens den euklidischen Abstand der äußeren Punkte, woraus schließlich die wahren Dimensionen des Kennzeichens hervorgehen.

4.2.8 Lagebeziehung

In der Abbildung 4.16 (a) ist die Problematik dargestellt, dass es häufig Reflexionen am Fahrzeug gibt, die von der Größe, dem Reflexionswert und dem Trägerobjekt mithilfe der LiDAR-Messtechnik nicht voneinander unterschieden werden können. Solche Bereiche sind beispielsweise die Rückstrahler oder retroreflektierende Aufkleber sowie Folierungen.

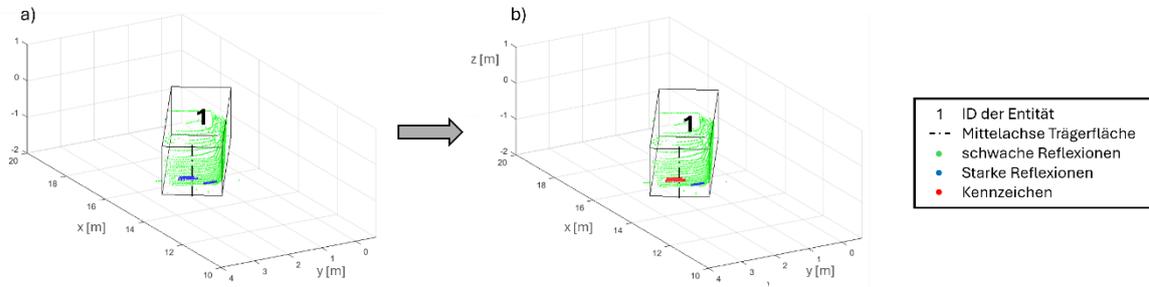


Abbildung 4.16: Auswahl des korrekten Segments anhand der Lagebeziehung (Bsp.: Leishen LS128S2)

Da sich die Attributwerte aller sondierten Cluster in einem Frame auf dieselbe Punktwolke beziehen, kann der Vergleich der Segmente über die abgespeicherte Position des Trägerobjekts erfolgen. Ist diese bei verschiedenen Clustern gleich, wurden die Reflexionen vom selben Fahrzeug erzeugt. Nur für diese Segmente wird die Filterung anhand der Lagebeziehung vorgenommen. Da der Gesetzgeber lediglich eine Bodenfreiheit von 20 cm vorschreibt (siehe Abschnitt 2.5.1), können Kennzeichen nahezu überall an dem Heck oder der Front des Fahrzeugs angebracht werden. Allein aus den Informationen, welche durch das Lasermessprinzip bereitgestellt werden, gelingt bei mehreren potenziellen Kennzeichen am selben Fahrzeug keine Auswahl des korrekten Segments (siehe Abbildung 4.16, a). Daher wird die Annahme getroffen, dass Nummernschilder in den meisten Fällen mittig an der Trägerfläche (Fahrzeugheck beziehungsweise -front) montiert sind. Die mittige Ausrichtung gilt in der Regel aber nicht für die z-Dimension. Deshalb wird im nächsten Schritt für das entsprechende Trägerfahrzeug die Mittelachse der Trägerfläche erstellt.

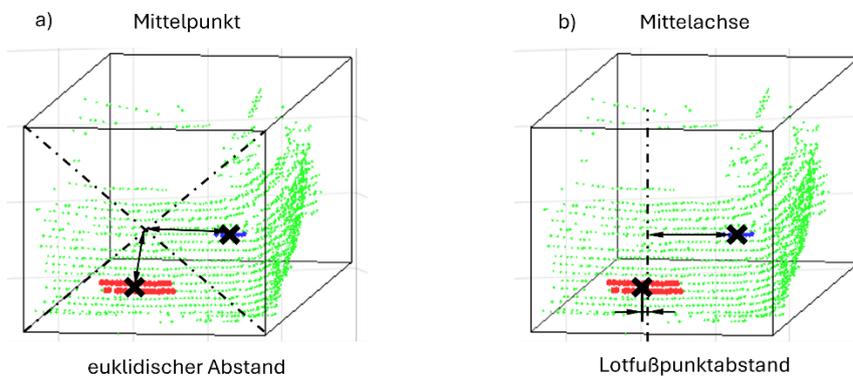


Abbildung 4.17: Wahl der Methode zur Abstandsberechnung (Bsp.: Leishen LS128S2)

Abbildung 4.17 verdeutlicht den Unterschied zwischen zwei Methoden der Abstandskalkulation. Die Betrachtung der Lagebeziehung der relevanten Segmente bezüglich des Stirnflächenmittelpunktes des Quaders ist nicht zielführend (a). Denn einige kennzeichenähnliche Segmente weisen einen ähnlichen euklidischen Abstand zu diesem Referenzpunkt wie das tatsächliche Kennzeichen auf. Für die Auswahl des korrekten Clusters wird daher der senkrechte Abstand zur Mittelachse der Bezugsfläche verwendet (b). Die implementierten Rechenschritte sind in der Datei *selectMiddleCluster* ersichtlich.

4.2.9 Instanzsegmentierung

Da die Kennzeichenerkennung ebenfalls für eine Witterungs- und Verschmutzungserkennung verwendet werden soll, ist es notwendig, Kennzeichenexemplare voneinander zu unterscheiden, um sie separat voneinander hinsichtlich ihrer Reflexionseigenschaften untersuchen zu können.

Mithilfe der Instanzsegmentierung werden die als Kennzeichen klassifizierten Cluster anhand des Trägerobjekts in eindeutig identifizierbaren Kennzeichenexemplare getrennt. Um die Zuordnung übersichtlich zu gestalten, wird der Algorithmus nach den Regeln der objektorientierten Programmierung entwickelt.

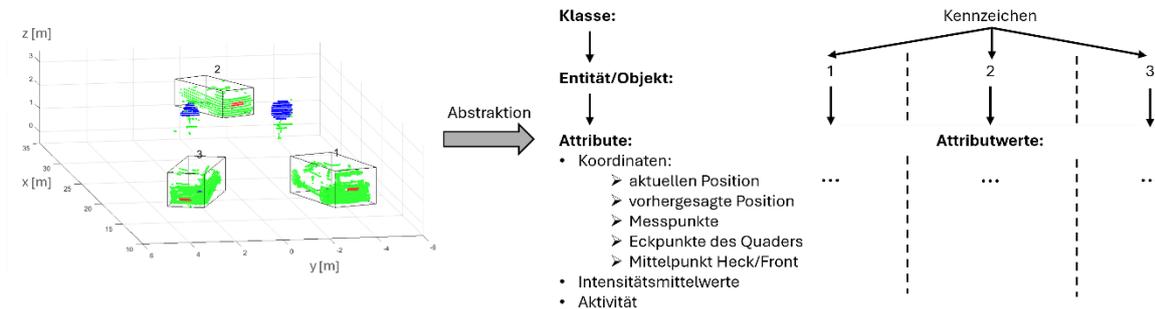


Abbildung 4.18: Überführen erkannter Kennzeichen in Objektstruktur (Bsp.: Leishen LS128S2)

Abbildung 4.18 zeigt die Unterteilung der Objektstruktur in Attribute (Eigenschaften) und entitätsspezifischen Attributwerten. Eine Entität ist ein Exemplar, welches einer Klasse angehört. Alle extrahierten Entitäten einer Messung gehören der Klasse der Kennzeichen an. Ebenso wäre eine Klasseneinteilung anhand der Trägerfahrzeuge denkbar. Für die Intensitätsuntersuchung der Kennzeichen hinsichtlich der Entwicklung der Verschmutzungsbeziehungswise Witterungserkennung ist eine differenzierte Klasseneinteilung jedoch überflüssig. Der entsprechende Programmcode kann der Datei *classification.m* entnommen werden.

4.3 Verschmutzungserkennung

In der Konzeptentwicklung der Verschmutzungserkennung wurde eine Logik entdeckt, die unabhängig von der erläuterten Kennzeichenerkennung eine Approximation der Ablagerung an der Sensorscheibe ermöglicht. Die detaillierte Umsetzung wird im Folgenden erläutert. Die Rechenschritte des Algorithmus wurden in einem Programmablaufplan zusammengefasst (siehe Anlagen, Abbildung D.3). Der wiederholte Aufruf dieser Software erfolgt analog zum Hauptskript der Witterungserkennung (siehe Anlagen, Abbildung D.6).

4.3.1 Quantifizierung der Verschmutzungsstärke

Um eine objektive Messwertanalyse durchführen zu können, müssen die verschiedenen Ablagerungen auf den Folien quantitativ beschrieben werden. Hierbei wird angenommen, dass die Stärke der Verschmutzung über die Dichte der Schmutzpartikel ausgedrückt werden kann. Eine dichte Partikelverteilung lässt weniger Laserlicht durch als eine Verschmutzung, bei der auf gleicher Referenzfläche weniger Schmutzteilchen zu finden sind. Diese Annahme gilt jedoch nur innerhalb eines Verschmutzungsmediums, in welchem die Brechzahl näherungsweise konstant ist. Die Brechzahl beschreibt indirekt, wie hoch die optische Durchlässigkeit eines Stoffes ist. Der Anteil des reflektierten Lichtes, hängt zudem vermutlich von der Dicke des Schmutzfilms ab. Das Ziel der Quantifizierung der Verschmutzungsfolien ist jedoch nicht die exakte Bestimmung der Wellenausbreitung. Stattdessen soll lediglich eine objektive tendenzielle Einordnung der Verschmutzungsstärken erfolgen. Hierfür wurde eine kamerabasierte Bildverarbeitung entwickelt.

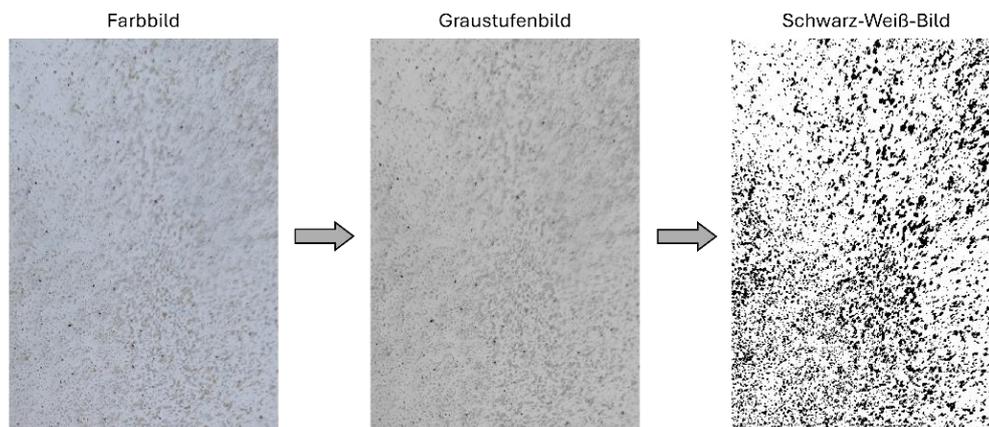


Abbildung 4.19: Umwandlung des Farbbildes in ein Schwarz-Weiß-Bild (Verschmutzung: Sand)

Abbildung 4.19 zeigt die schrittweise Umwandlung einer farbigen Fotografie einer mit Sand verschmutzten Folie in eine Schwarz-Weiß-Darstellung. Das Ziel ist die Quantifizierung der Verschmutzungsverteilungsdichte v (kurz: Verschmutzungsdichte) anhand des Anteils schwarzer Pixel an der Gesamtpixelanzahl. Während der Bildaufnahme wird beachtet, dass der Abstand der betrachteten Objekte zur Kamera in gewissen Grenzen gleich ist, da die Anzahl der Pixel je Flächeneinheit der Folie von der Entfernung (Gegenstandsweite) ab-

hängt. Da die Berechnung des Schwarzanteils lediglich grobe Richtwerte erzeugen soll, wird darauf verzichtet, die Abweichungen von der exakten orthogonalen Fotografie über eine Entzerrung zu eliminieren.

Im ersten Schritt wird jede farbige Fotografie manuell auf ein einheitliches Format zugeschnitten. Anschließend erfolgt die Konvertierung des Farb- in ein Graustufenbild mithilfe der Matlab-Funktion `rgb2gray`. Hierbei wird jedem Pixel ein Wert zwischen 0 und 255 (Grautöne) zugewiesen, wobei 255 ein ideal weißen und der Wert 0 ein ideal schwarzen Pixel repräsentiert. Nachfolgend findet eine Pixelfilterung anhand eines Grenzwertes statt: Pixel die einen geringeren Wert aufweisen, werden als weiße Pixel klassifiziert. Der verbleibende Teil wird schwarz koloriert und repräsentiert die Schmutzpartikel. Durch diese Klassifizierung wird aus dem Graustufenbild ein Schwarz-Weiß-Bild generiert. Da die Verschmutzungsfolien bei gleicher Belichtung und äquivalenten Abstand zur Linse fotografiert wurden, kann ein einheitlicher Schwellwert für jede der realisierten Ablagerungen festgelegt werden. Im letzten Schritt wird der Anteil der schwarzen an der Gesamtpixelanzahl berechnet. Die Ergebnisse der Bildverarbeitungsmethode sind in folgender Grafik ersichtlich.

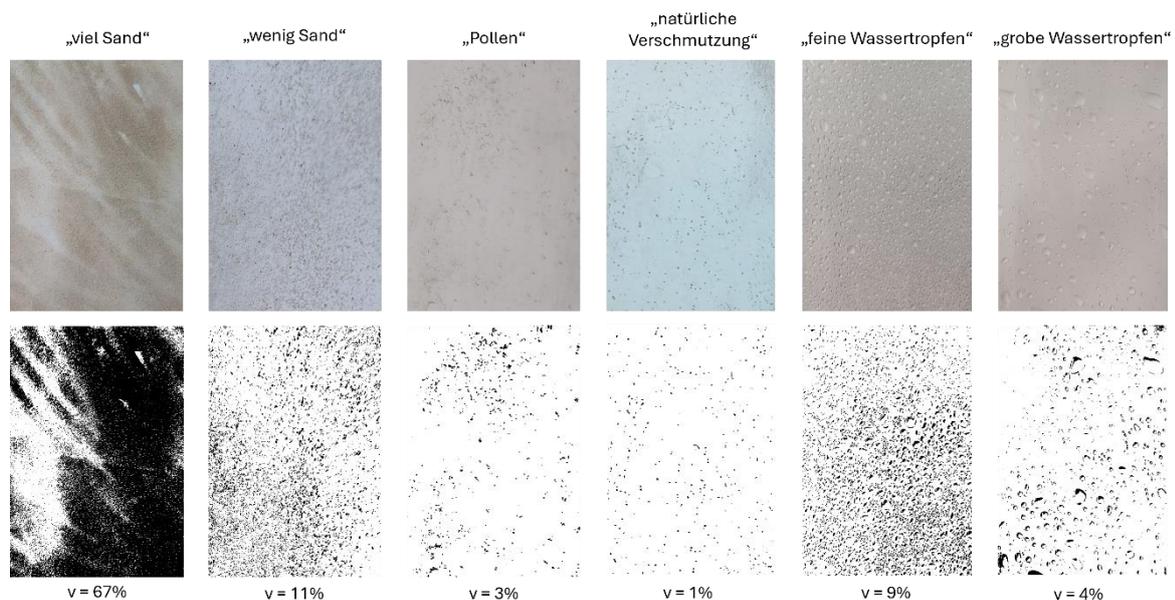


Abbildung 4.20: Einordnung der Verschmutzungen anhand der Verschmutzungsdichte

Die realen Verschmutzungen sind in den Farbbildern der Abbildung 4.20 schlecht ersichtlich. Dies resultiert aus der möglichst homogenen schwachen Belichtung. Andernfalls würden helle Spiegelungen auf der Folie zur Verkleinerung der lokalen Graustufen führen, weshalb Schmutzpartikel in diesem Bereich fälschlicherweise als weiße Pixel klassifiziert werden würden.

Im Konzept der Verschmutzungserkennung (siehe Abschnitt 3.7) wurde erwähnt, dass eine Sensorscheibe, welche frei von Ablagerungen ist, stets einen Teil der Lichtwellen reflektiert.

Eine saubere Glasscheibe erzeugt daher einen festen Prozentsatz an Nahbereichsreflexionen bezogen auf die Anzahl der ausgesendeten Strahlen. Es bleibt zu klären, ob eine verschmutzte Glasscheibe mehr Nahbereichsreflexionen verursacht. Ferner wird geprüft, ob es eine Abhängigkeit zwischen der Verschmutzungsdichte und der Menge der Nahbereichsreflexionen gibt. Hierfür wird die Bildverarbeitungssoftware genutzt, welche im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt wurde und die Bezeichnung *blackAndWhitePercentage.m* trägt.

4.3.2 Sensorspezifische Besonderheiten

Die sensorinterne Verarbeitung der Nahbereichsspiegelungen kann auf zwei Weisen erfolgen. Entweder der LiDAR leitet nur die Informationen über Punkte weiter, die außerhalb dieses kritischen Bereichs liegen. Dieses Verfahren wird vom Leishen LS128S2 angewendet. Andernfalls können die Lichtquanten, die unmittelbar nach dem Aussenden empfangen werden, als Nahbereichsreflexionen klassifiziert und mit im Datenstrom versendet werden. Diesen Punkten können aufgrund der großen Messunsicherheit keine Koordinaten zugeordnet werden. Die Scanner Ouster OS1 und Livox Horizon klassifizieren sie deshalb als Punkte mit den Koordinaten $v_{nah} = (0; 0; 0)$.

Im Folgenden werden die sensorspezifischen Potentiale zur Implementierung des Konzepts erläutert.

Die beiden optischen Umfeldsensoren **Ouster OS1** und **Livox Horizon** haben den Vorteil, dass sie die Nahbereichsreflexionen abspeichern. Da diese Punkte dieselben Koordinaten besitzen, ist eine Visualisierung im Koordinatensystem nicht sinnvoll. Stattdessen wird lediglich die Anzahl der Punkte im Koordinatenursprung bezogen auf die Gesamtpunktzahl in Abhängigkeit der Verschmutzungsdichte ausgewertet. Mit der Gesamtpunktzahl sind alle Punkte gemeint, welche in 600 Frames abgespeichert wurden. Für eine Scanrate von $f_{Scan} = 10 \text{ Hz}$, umfasst eine Ablagerungsanalyse daher 60 Sekunden. Dieser Wert kann beliebig verändert werden. Für eine robuste Berechnung des Anteils der Nahbereichsreflexionen p_{nah} ist es allerdings ratsam die Integrationszeit nicht zu vermindern.

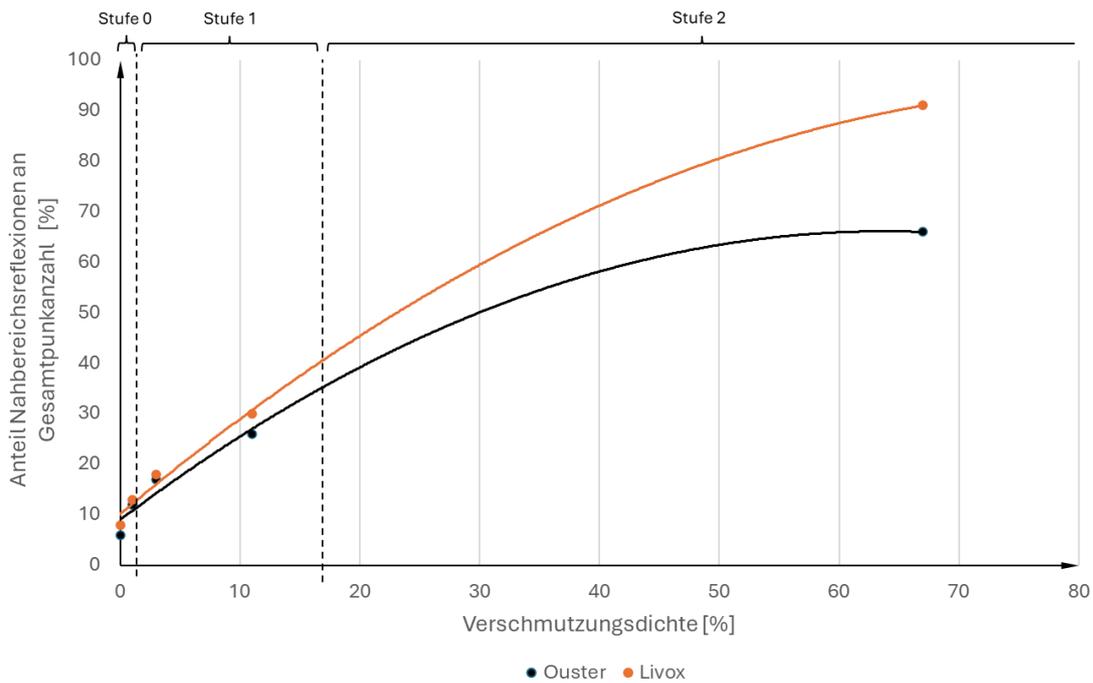


Abbildung 4.21: Abhängigkeit der Nahbereichsreflexionen von der Verschmutzungsdichte

Abbildung 4.21 verdeutlicht, dass es einen Zusammenhang zwischen dem Anteil schwarzer Pixel v , der den Verschmutzungsgrad objektiv widerspiegelt, und dem Anteil der Nahbereichsreflexionen p_{nah} gibt. Für die Erstellung der Graphen wurden die Messungen, in denen Wasserablagerungen auf die Sensorscheiben aufgebracht wurden, nicht berücksichtigt, da diese von dem sichtbaren Anstieg des Graphen stark abweichen. Dies ist der Beweis dafür, dass mit der entwickelten Bildverarbeitung für die Quantifizierung des Verschmutzungsgrades lediglich die Dichte der Schmutzpartikel beziehungsweise Wassertropfen berechnet wird. Deren Brechzahl bleibt dabei unberücksichtigt. Bei den Stoffklassen Sand, Erde und Pollen handelt es sich um nahezu lichtundurchlässige Partikel. Wasser reflektiert dahingegen nur einen kleinen Teil des Laserlichtes, weshalb auch bei einem sehr dichten Wassertropfenfilm, der einen vergleichsweise hohen Anteil schwarzer Pixel von $v \approx 9\%$ verursacht, wenig Nahbereichsreflexionen entstehen. Um den Inhalt dieser Diplomarbeit abzugrenzen, wird eine Verschmutzungsanalyse ausschließlich für lichtundurchlässige Schmutzpartikel entwickelt.

Der Verschmutzungsalgorithmus berechnet mithilfe der Kehrfunktion der Kennlinie aus Abbildung 4.21 die Verschmutzungsdichte v . Dieser Wert wird schließlich in eine der drei Verschmutzungsstufen eingeordnet und eine entsprechende Mitteilung ausgegeben. Auf die Abstufung der Verschmutzungsdichte v wird im Abschnitt 4.3.3 eingegangen.

Im Messbetrieb des **Leishen LS128S2** werden die Nahbereichsreflexionen sensorintern aussortiert und stehen nicht im Datenstrom zur Verfügung. Es wurde jedoch beobachtet, dass der Intensitätsmittelwert der gesamten Punktwolke durch die Verschmutzung abnimmt. Der Grund dafür ist vermutlich die Brechung an den Schmutzpartikeln.

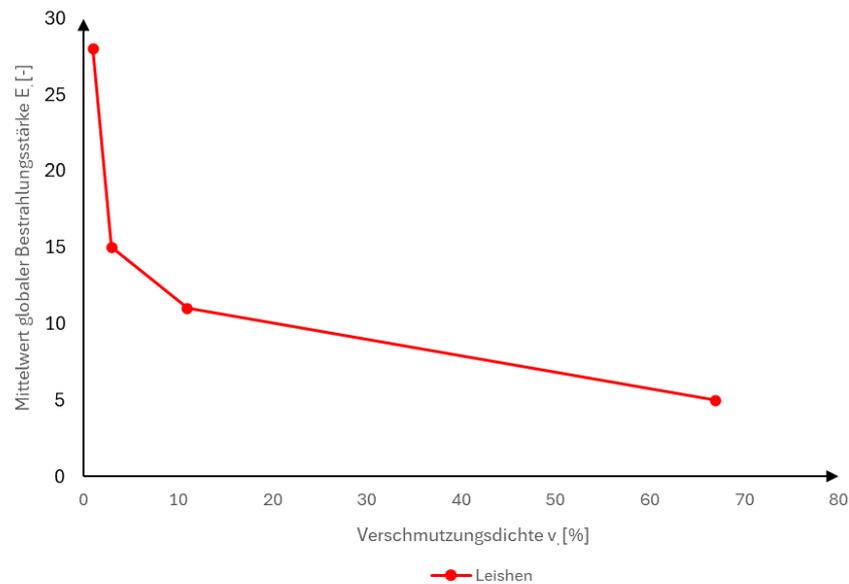


Abbildung 4.22: Abhängigkeit des Intensitätsmittelwerts von der Verschmutzungsdichte (Leishen LS128S2)

Abbildung 4.22 visualisiert die Abhängigkeit zwischen dem globalen Mittelwert der Bestrahlungsstärkewerte und der Verschmutzungsdichte. Die Bestrahlungsstärke aller Punkte eines Frames ist neben der Verschmutzung ebenfalls abhängig von der Oberflächenreflektivität R , der Objektentfernung r und dem Strahleinfallswinkel α (siehe Gleichung 2.4). Für eine sichere Abschätzung der Verschmutzungsstärke müssen demzufolge weitere umgebungsunabhängige Referenzgrößen analysiert werden. Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit wird auf weitere Untersuchungen verzichtet und daher nur für die Laserscanner Ouster OS1 und Livox Horizon die Verschmutzungseinordnung praktisch umgesetzt.

4.3.3 Abstufung

Die Frage nach der Feinheit der Einteilung der Verschmutzung anhand des Anteils an Nahbereichsreflexionen erfolgt anhand der Beeinflussung der Punktwolke. Das bedeutet, dass sehr geringe Ablagerungen (Stufe 0) nicht gemeldet werden, da die Punktwolke, welche die Objekte beinhaltet, kaum beeinträchtigt wird.

Die *Stufe 1* der Verschmutzungsstärke wird erreicht, sobald eine sichtbare Verschlechterung der Umgebungsabbildung eintritt. Die *Stufe 2* repräsentiert Situationen, in denen die Kennzeichendetektion kaum noch möglich ist. Dementsprechend kann dem Fahrer oder gegebenenfalls der Selbstreinigungseinrichtung die Dringlichkeit der Reinigung mitgeteilt werden. Eine kontinuierliche Einteilung des Verschmutzungsgrades ist nicht sinnvoll, da die Anzahl der Nahbereichsreflexionen mit gewissen Schwankungen verbunden ist. Die Menge an Informationen, die in neuen Fahrzeugen auf die Insassen wirkt, ist ein weiterer Grund dafür, die Verschmutzungsanzeige in drei Stufen zu unterteilen, wobei nur beim Erreichen der Stufen 1 oder 2 der Fahrer benachrichtigt wird.

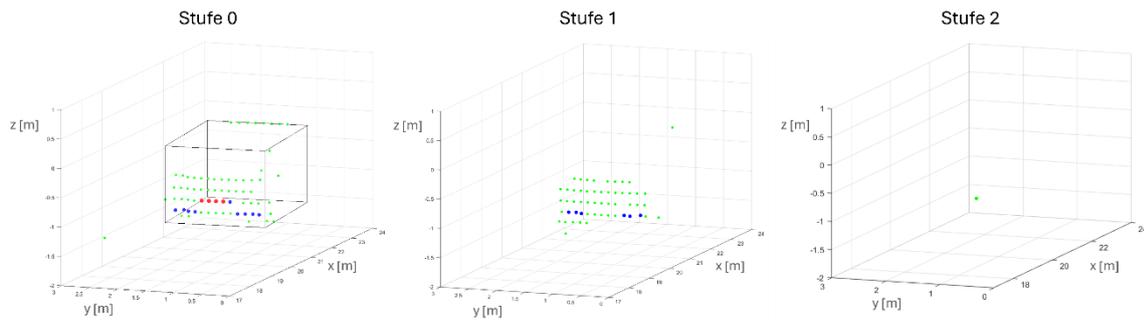


Abbildung 4.23: Sichtbeeinflussung in den drei Verschmutzungsstufen (Bsp.: Ouster OS1)

Die Abbildung 4.23 verdeutlicht die Verschlechterung der Umgebungsabbildung infolge verschieden starker Sensorverschmutzung. Die nachfolgende Tabelle fasst diesbezüglich Besonderheiten innerhalb einer Verschmutzungsklasse zusammen.

Tabelle 4.4: Besonderheiten der Verschmutzungsstufen

Verschmutzungsstufe	0	1	2
Sichtbeeinflussung	keine	leicht	stark
mögliche Verschmutzung	„Pollen“, „natürliche Verwitterung“,	„wenig Sand“	„viel Sand“
Dringlichkeit der Reinigung	keine	bei nächster Gelegenheit	sofort
Verschmutzungsdichte v [%]	$v_0 < 5$	$5 \leq v_1 < 20$	$v_2 \geq 20$

Die Software der Verschmutzungserkennung ist unter der Bezeichnung *pollution.m* zu finden. Der periodische Aufruf erfolgt mithilfe des zentralen Skripts *main_pollution.m*.

4.4 Witterungserkennung

Die Erkennung der Witterung wird in zwei Algorithmen gegliedert: Auf der einen Seite erfolgt die Abschätzung der Art beziehungsweise der Menge des **Niederschlags**. Auf der anderen Seite wird die **Feuchtigkeit der Fahrbahn** analysiert.

Die beiden unabhängigen Algorithmen werden von einem zentralen Skript (siehe Anlagen, Abbildung D.6) aufgerufen. So ist es möglich, dass die Witterungserkennung alle 60 Sekunden auslöst und den Witterungszustand über diese Zeit erfasst. Bei einer durchschnittlichen Taktrate von $f_{Scan} \approx 10 \text{ Hz}$ werden demnach rund 600 Frames für die Analyse eines Witterungszustandes genutzt. Geringere Betrachtungsphasen würden zu höheren Schwankungen der Ergebniswerte führen. Längere Zeiträume haben zur Folge, dass Wetteränderungen möglicherweise verzögert wahrgenommen werden. Beinhaltet die Messung weniger als 600 Frames, wird der Betrachtungszeitraum an die Länge der Messung

angepasst. Dieser Zyklus ist in dem Hauptskript der Witterungserkennung *main_weather.m* implementiert.

4.4.1 Fahrbahnfeuchtigkeit

Im Abschnitt 3.8 wurde bereits erläutert, wie Spiegelungen an der nassen Bodenebene entstehen. Um die Feuchtigkeitsreflexionen (abgelenkter Strahlenverlauf, siehe Abbildung 3.7) von den direkten Reflexionen (paralleler Strahlenverlauf) zu unterscheiden, ist eine Filterung anhand der Intensitäten nicht zielführend. Trotz der doppelten Reflexion abgewinkelten Strahlengang gibt es direkte Reflexionen, die geringere Rückstrahlwerte aufweisen. Daher wird die Kenntnis genutzt, dass sich die gesuchten Spiegelungen scheinbar unter der Bodenebene befinden. In den Anlagen (siehe Abbildung D.4) wird die Logik der Feuchtigkeitserkennung mithilfe eines Programmablaufplan verdeutlicht. Analog zu der Kennzeichenerkennung wird jede Punktwolke einer Messung vorkonditioniert (siehe Abschnitt 4.1). Die Anwendung eines CropBox-Filters erfolgt analog zur Kennzeichenerkennung. Anschließend werden die Bodenpunkte mithilfe des morphologischen Filters *segmentGroundSMRF* aus der Matlab-Funktionsbibliothek segmentiert. Daraufhin wird an diese Punkte eine Ebene angenähert.

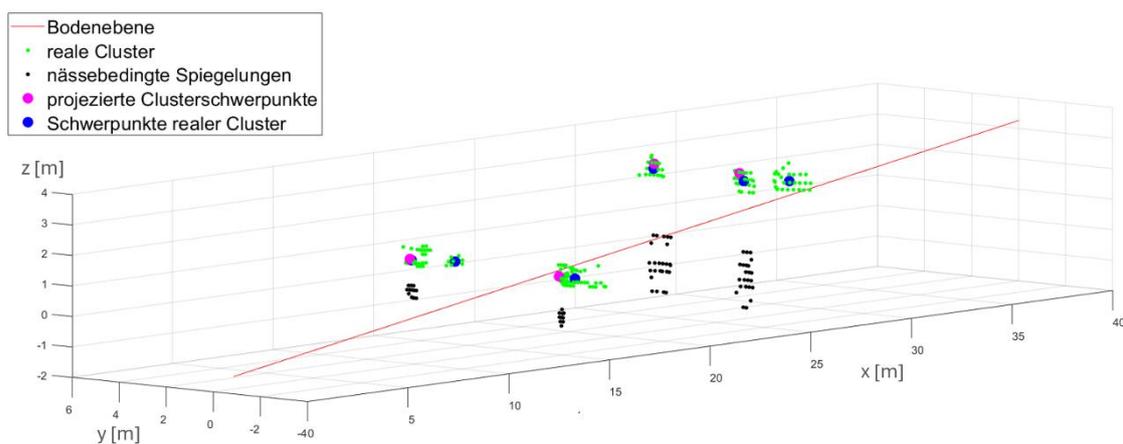


Abbildung 4.24: segmentierte Punktwolke mit nässebedingten Spiegelungen (Bsp.: Ouster OS1)

Die angepasste Ebene ist in Abbildung 4.24 als rote Gerade dargestellt, um die Sichtbarkeit der Spiegelbilder nicht zu beeinflussen. Die angenäherte Fläche ist mithilfe der Ebenengleichung eindeutig definiert. Die Berechnung der Koeffizienten muss möglichst exakt sein, um eine korrekte Trennung der darüberliegenden (reale Objekte) und der darunterliegenden Punkte (nässebedingte Spiegelungen) zu erzielen. Daher ist es nicht ausreichend, drei beliebige Bodenpunkte zu wählen und mithilfe des Kreuzproduktes zweier Richtungsvektoren der Ebene den Normalenvektor und daraus die Ebenengleichung herzuleiten. Hierbei kann die Lage der Punkte variieren und Ungenauigkeiten hervorrufen. Daher wird auf die Matlab-

operation *pcfitplane* zurückgegriffen, um die Koeffizienten der Gleichung zu bestimmen. Die Ausgabe der Ebenengleichung erfolgt in Koordinatenform

$$ax + by + cz + e = 0 \quad (4.7)$$

Anschließend wird die Punktwolke an der Bodenebene in den darüberliegenden und darunterliegenden Bereich getrennt (siehe Abbildung 4.24, grüne bzw. schwarze Punkte). Die Klassifikation dieser Punkte, die nicht zur Bodenebene gehören, wird mithilfe eines Vergleichs der z-Koordinate realisiert. Durch Umwandlung der Ebenengleichung 4.7 folgt:

$$z_{theo.} = \frac{-ax_{tats.} - by_{tats.} - e}{c} \quad (4.8)$$

Das Lösen der Gleichung liefert den theoretischen z-Wert, den ein Punkt mit den Koordinaten $(x_{tats.}, y_{tats.}, z_{tats.})$ aufweisen muss, um exakt in der berechneten Bodenebene zu liegen. Der theoretische z-Wert wird nun mit der tatsächlichen z-Koordinate des betrachteten Punktes verglichen. Die Fallunterscheidung ist nachfolgend aufgeführt:

1. direkter Reflexionspunkt: $z_{tats.} > z_{theo.} + \frac{1}{2}T$
2. nässebedingter Reflexionspunkt: $z_{tats.} < z_{theo.} - \frac{1}{2}T$

Durch das Hinzufügen eines Toleranzbereiches ($\pm 0,5 T$) wird bewirkt, dass der Boden scheinbar eine Dicke T aufweist, die auf $T = 60 \text{ cm}$ festgelegt wird. Dies ist erforderlich, damit Bodenunebenheiten nicht dazu führen, dass Bodenpunkte als Objekte segmentiert werden. Zudem sind Rauschpunkte unterhalb der Bodenebene vorhanden, die ebenso von der Annahme einer planaren Bodenfläche abweichen. Diese bodennahen Punkte treten auch im Trockenzustand der Fahrbahn auf und sind in der Abbildung 4.25 (a) rosa markiert.

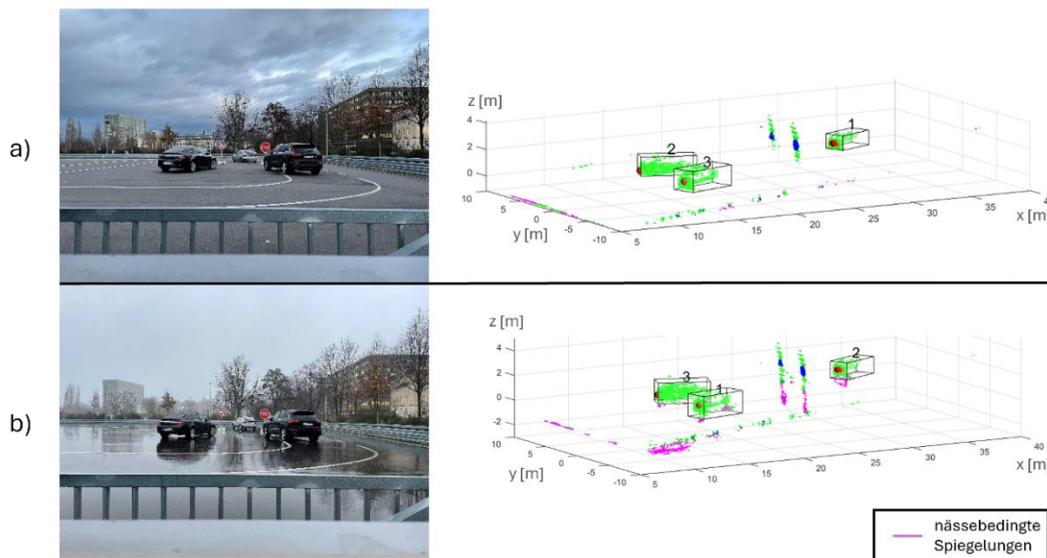


Abbildung 4.25: Vergleich Fahrbahnässe, a) trockene Fahrbahn, b) nasse Fahrbahn (Bsp: Leishen LS128S2)

Abbildung 4.25 verdeutlicht, dass es trotz der Eliminierung der bodennahen Spiegelungen vereinzelt Reflexionen gibt, die nicht zwangsweise auf eine nasse Straße zurückzuführen sind (a). Die Abfrage der Anzahl der nässebedingten Spiegelpunkte führt zwar in den meisten Fällen zur korrekten Abschätzung des Nässezustandes, doch bei welligem Untergrund reicht der Toleranzbereich des Bodens von 60 cm nicht aus, sodass tiefe Unebenheiten oder Rauschpunkte als nässebedingte Spiegelungen wahrgenommen werden. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Tiefe der Spiegelungen unter der Bodenebene nicht der Höhe des realen Objekts entspricht. Denn während die Verkehrszeichen komplett unter der Bodenebene erscheinen, sind die Fahrzeugspiegelungen nur teilweise vorhanden (b). Dies ist auf die Reflexionsstärke der Oberflächen zurückzuführen. Denn die vom Laser emittierten Strahlen, die an der Wasseroberfläche Richtung Objekt diffus reflektiert werden, erfahren bei der Spiegelung am Gegenstand eine weitere Streuung. Da die schwarzen Lackierungen der Fahrzeuge nur einen kleinen Teil dieser Lichtquanten zurückwerfen, reicht die resultierende Intensität nicht aus, um diese Strahlen am LiDAR zu messen. Die hellen Oberflächen der Verkehrsschildhalterungen bewirken aufgrund des hohen Reflexionsvermögens dahingegen starke Spiegeleffekte. Diese Beobachtungen machen deutlich, dass eine Objekterkennung in den Spiegelungen nicht für jeden Fall erfolgreich ist.

Fahrzeugkennzeichen sind nicht als Spiegelobjekte unter der Bodenebene vorhanden, da sie den Großteil des eintreffenden Lichts in dieselbe Richtung zurücksenden, aufgrund dessen ist die Kennzeichendetektion für die Erkennung der Fahrbahnnässe nicht relevant.

In der entwickelten Problemlösung werden die Spiegelungen als Teilmenge von realen Objekten verstanden. Da jede dieser virtuellen Objektpunkte durch Reflexion eines realen Punktes an der Bodenebene entstand, kann ein Teil der oberen Punkte in den unteren gefunden werden. Daher wird zunächst die untere und obere Punktwolke geclustert. Dabei kommt die selbst entwickelte deterministische Clustermethode zum Einsatz (siehe Abschnitt 4.2.4). Hierbei wird der Vorteil genutzt, dass durch die Definition einer Mindestpunktzahl je Cluster gleichzeitig Rauschpunkte eliminiert werden. Schließlich werden die geometrischen Schwerpunkte der Cluster unterhalb der Bodenebene in den realen Objektraum projiziert (siehe Abbildung 4.24, rosa Punkte). Die Bodenfläche bildet die Spiegelebene. Da die Spiegelung senkrecht zur Bodenebene erfolgt, ist die Verschiebungsrichtung der zu spiegelnden Elemente durch den Normalvektor der Ebene definiert. Um diesen aus der Koordinatenform (siehe Gleichung 4.7) ablesen zu können, werden die Koeffizienten a , b und c extrahiert. Der Normalvektor beträgt demnach:

$$\vec{n}_E = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

Die projizierten Punkte können schließlich wie folgt berechnet werden:

$$\vec{v}_{proj.} = \vec{v}_{Spiegel} + \frac{2 * d_{Lot} * \vec{n}_E}{|\vec{n}_E|} \quad (4.9)$$

Diese Gleichung muss auf jeden nässebedingten Spiegelpunkt mit dem Ortsvektor $\vec{v}_{Spiegel}$ angewendet werden. Hierbei ist $|\vec{n}_E|$ die Länge des Normalenvektors und d_{Lot} der Lotfußpunktabstand zwischen dem aktuellen Punkt und der Ebene. Für die Quantifizierung dieses Abstandes wird folgende Formel verwendet:

$$d_{Lot} = \frac{(-a * v_{x,Spiegel}) * (-b * v_{y,Spiegel}) + (c * v_{z,Spiegel}) - e}{|\vec{n}_E|} \quad (4.10)$$

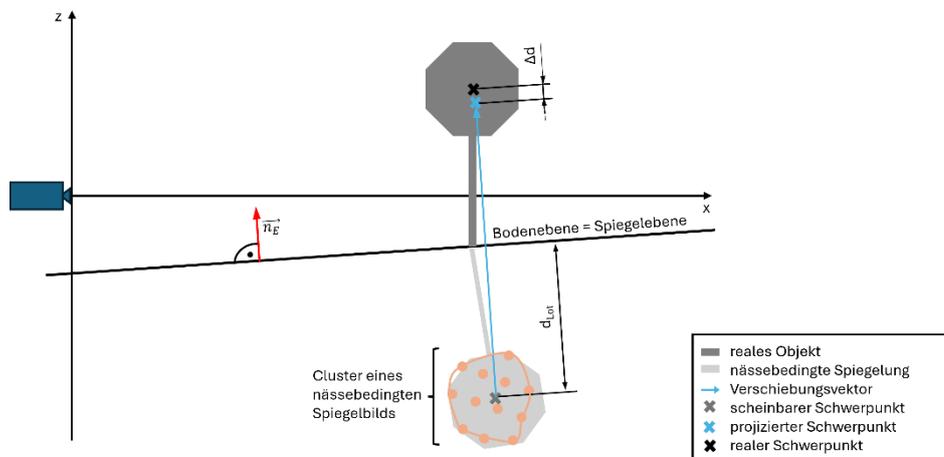


Abbildung 4.26: Projektion des geometrischen Schwerpunkts eines nässebedingten Clusters

Abbildung 4.26 veranschaulicht die Berechnung der projizierten Clusterschwerpunkte. Für jeden dieser projizierten Spiegelpunkte wird anschließend das nächstgelegene reale Objekt anhand des geometrischen Schwerpunktes gesucht (paarweise Zuordnung). Dieser Gegenstand muss eine Mindestintensität aufweisen, da bereits erklärt wurde, dass nur reale Objekte mit mittleren bis hohen Reflexionswerten nässebedingte Spiegelungen hervorrufen können. Liegt der Abstand Δd zwischen dem projizierten und dem nächstgelegenen realen Schwerpunkt unter einem festgelegten Schwellwert ($\Delta d \leq 50 \text{ cm}$), wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um das dazugehörige Objekt handelt. Das bedeutet, dass dem Cluster des nässebedingten Spiegelbilds das dazugehörige reale Objekt zugeordnet werden konnte. Wird diese Bedingung für die meisten Punktpaare erfüllt, schließt die Software für den untersuchten Zeitpunkt auf eine nasse Fahrbahn. Wie bereits erwähnt, umfasst ein Betrachtungszeitraum 600 Frames. Wird in mindestens der Hälfte dieser Takte eine nasse Fahrbahn detektiert, so handelt es sich mit großer Sicherheit um eine Bodenebene, die einen Wasserfilm aufweist und der Bediener wird schließlich mit einer Textausgabe gewarnt. Eine differenzierte Einteilung des Nässegrades konnte nicht erreicht werden, da die Feuchtigkeit beziehungsweise die Höhe des Wasserfilms im Beobachtungsbereich variiert.

ren kann und kein direkter Zusammenhang zwischen dieser Witterungsbedingung und den Spiegelungen gefunden wurde. Die Datei *wetRoadDetection.m* enthält die beschriebenen implementierten Verarbeitungsschritte.

4.4.2 Niederschlag

Im Abschnitt 3.9 wurde verdeutlicht, dass Niederschlag zu einem erhöhten Aufkommen von Rauschpunkten führt. Mithilfe des folgenden Diagramms wird diese These geprüft.

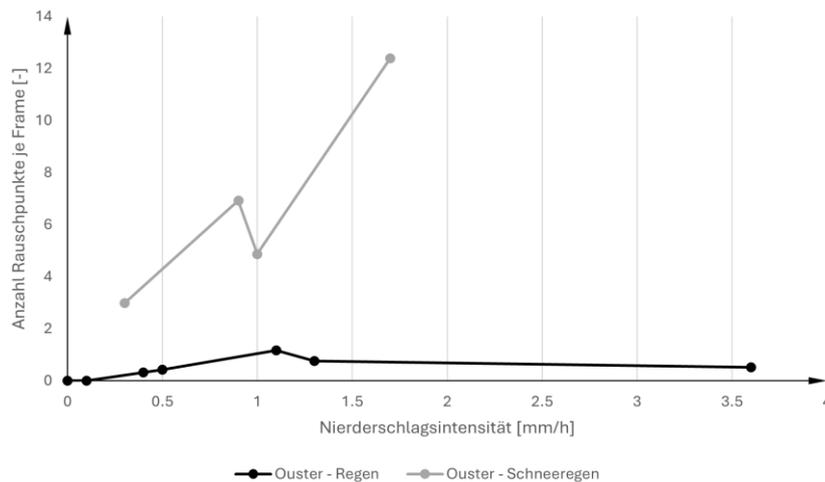


Abbildung 4.27: Abhängigkeit der Rauschpunktanzahl von der Niederschlagsintensität

In der Abbildung 4.27 wird exemplarisch anhand des 360°-Laserscanners die Abhängigkeit der Rauschpunktanzahl in der ROI je Frame von der Niederschlagsintensität dargestellt. Hierbei werden die Zusammenhänge bei Regen beziehungsweise bei Schneeregen separat als Datenreihe visualisiert. Es wird deutlich, dass Schneeregen mehr Teilchenreflexionen erzeugt als Regen. Das impliziert, dass es eine Abhängigkeit der Anzahl der Rauschpunkte von der Art des Niederschlags gibt. Dies ist auf die Reflexionseigenschaften der Wasserpartikel zurückzuführen. Denn die Regentropfen lassen das Laserlicht leichter hindurch als die Eiskristalle des Schneeregens. Außerdem sind bei gleicher Niederschlagsmenge Wassertropfen in der Regel kleiner als Eiskristalle, wodurch sich im festen Sichtbereich eine höhere Wahrscheinlichkeit berechnen lässt, dass ein Laserstrahl auf ein Eiskristall trifft, im Vergleich zur Kollisionswahrscheinlichkeit mit einem Wassertropfen. Aus diesen Erkenntnissen geht das Ziel hervor, nicht nur die Existenz des Niederschlags zu detektieren, sondern darüber hinaus dessen Art (Regen oder Schneeregen) abzuschätzen. Innerhalb einer Niederschlagsart ist allerdings kein klarer ansteigender Trend der Rauschpunktanzahl infolge steigender Niederschlagsintensität zu verzeichnen. Die entsprechenden Diagramme der Sensoren Livox Horizon und Leishen LS128S2 sind in den Anlagen (siehe Abbildung E.9) dargestellt. Der Laserscanner Livox Horizon weist eine ähnliche Abhängigkeit auf: Schneeregen führt vermehrt zu Rauschpunkten im Vergleich zum Regenwetter. Innerhalb dieser Niederschlagsarten ist keine eindeutige

Korrelation zwischen der Niederschlagsintensität und der Rauschpunktanzahl zu erkennen. Im Messbetrieb des Mehrzeilenscanners Leishen LS128S2 treten kaum Rauschpunkte auf. Lediglich bei mittleren bis starkem Schneefall, wäre eine Witterungserkennung möglich. Folglich wird ausschließlich für die Scanner Livox Horizon und Ouster OS1 eine Niederschlagserkennung realisiert. Ferner haben die Untersuchungen gezeigt, dass es keine eindeutige Korrelation zwischen der Rauschpunktmenge und der Niederschlagsintensität innerhalb einer Niederschlagsart gibt. Daher wird für die beiden genannten Laserscanner lediglich folgende Witterungsabschätzung vorgenommen:

Tabelle 4.5: sensorspezifische Witterungsabstufung

Niederschlagsart	mittlere Anzahl Rauschpunkte n in ROI je Frame	
	<u>Ouster OS1</u>	<u>Livox Horizon</u>
kein Niederschlag	$0,0 \leq n \leq 0,01$	$0,0 \leq n \leq 0,01$
Regen	$0,01 < n \leq 2,0$	$0,01 < n \leq 10,0$
Schneeregen	$n > 2,0$	$n > 10,0$

Durch die Veränderung der Messauflösung des Ouster OS1 wurden keine merklichen Änderungen in der gemittelten Punktzahl festgestellt. Der Livox Horizon weist dahingegen eine Proportionalität der Rauschpunktanzahl von der Anzahl zusammengefügter Punktwolken auf. Die Angaben zu den Punktmengen des Livox Horizon sind auf die Kumulierung zweier Frames bezogen.

Zur Verdeutlichung der Rechenschritte, kann der Programmablaufplan (siehe Anlagen, Abbildung D.5) genutzt werden. Zu Beginn wird für die Analyse des Niederschlags ein quaderförmiges Beobachtungsgebiet definiert. Die Punkte in diesem Bereich werden mithilfe eines CropBox-Filters (siehe auch Abschnitt 4.2.1) extrahiert. Die Wahl des Quaders ist für das Ergebnis von Bedeutung, da ein sehr kleines Volumen dazu führt, dass die Annahme einer Gleichverteilung aufgrund großer Mengenschwankungen nicht gilt. Ist der Beobachtungsbereich zu groß, werden häufiger Objekte eingeschlossen, die zur Fehleinschätzung der Punktzahl führen. Für alle drei Sensoren wird ein universeller Quader definiert, der durch folgende Extremwerte der Koordinaten beschrieben wird:

$$C = [x_{min}; x_{max}; y_{min}; y_{max}; z_{min}; z_{max}]$$

$$C_{Wetter} = [3; 7; -2; 2; -0.5; 2]$$

In Situationen, in denen sich Gegenstände in diesem Quader befinden, würde die Punktzahl stark beeinflusst werden, daher pausiert in solchen Situationen die Analyse der

Rauschpunkte. Mithilfe üblicher Segmentierungsalgorithmen lässt sich das Objekt zwar in der Regel detektieren, doch bei sehr starkem Niederschlag ist es aufgrund der dichten Punktverteilung kaum möglich zu erkennen, ob sich ein Objekt im Beobachtungsfenster befindet. Um dennoch Gegenstände im Analysebereich zu detektieren, wird dieser in kleine äquivalente Teilquader geteilt. Für jeden Teilquader wird nun die Anzahl der darin befindlichen Punkte mit dem CropBox-Filter ermittelt. Die Kenntnis über die gleichmäßige Punktverteilung innerhalb der ROI kann nun genutzt werden, um Punktwolken auszusortieren, in denen eine stark inhomogene Verteilung vorliegt. In den Teilquadern, deren Punktzahl stark vom Mittelwert abweicht, befindet sich mit großer Sicherheit ein Objekt. Die Punktzahl wird in dieser Zelle nicht von dem Niederschlag, sondern vom Teilöffnungswinkel des LiDAR-Sensors bestimmt. Die implementierte Software zur Objekterkennung auf Grundlage der Punktdichte trägt die Bezeichnung *objInRoi.m* und wurde im Datenträger abgespeichert.

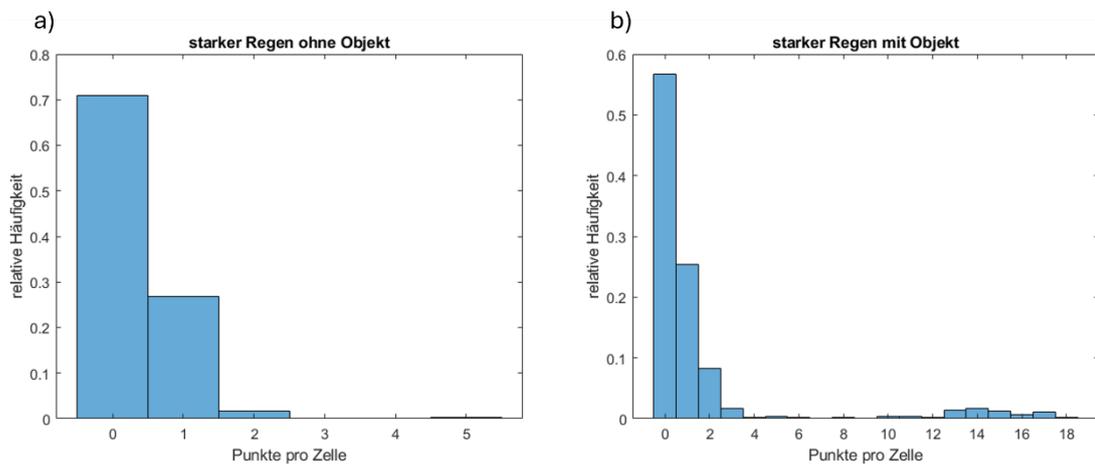


Abbildung 4.28: Häufigkeitsverteilung der Punktzahl pro Zelle, a) ohne Objekt, b) mit Objekt in der ROI

Abbildung 4.28 zeigt, welchen Einfluss die Existenz eines Objekts in der ROI auf die Punktzahl innerhalb einer Zelle hat. Die maximale relative Häufigkeit tritt bei der Punktzahl null auf. Mit steigendem Abstand von diesem Extremwert nehmen die relativen Häufigkeiten stetig ab. Diese Eigenschaft deutet auf eine Normalverteilung hin, was auf die zufällige Verteilung der Rauschpunkte innerhalb des Beobachtungsgebiets zurückzuführen ist. Im Histogramm ist keine Glockenkurve ersichtlich, da die Punktzahl pro Zelle bei symmetrischer Verteilung um den Maximalwert 0 auch negative Werte annehmen würde. Da die Anzahl als positive Größe definiert ist, wird daher nur die rechte Hälfte der Normalverteilung dargestellt.

Die Standardabweichung liegt Untersuchungen zufolge unabhängig von der Niederschlagsart und -menge im Bereich von $0,7 \leq \sigma \leq 1,8$. Dieser Wert steigt drastisch, wenn sich ein Gegenstand im Beobachtungsgebiet befindet. Erfahrungsgemäß gilt dann für die Häufigkeitsverteilung auch für Objekte mit geringem Volumen: $\sigma \geq 3$.

Mithilfe dieses Unterscheidungsmerkmals werden schließlich Frames, in denen mindestens ein Gegenstand in der ROI existiert, aussortiert. Die Punktzahlen der restlichen homogenen Teilquader im linken Bereich des Histogramms (b) werden nicht für die Witterungsschätzung verwendet, da bei ungünstiger Lage des Objektes nur wenige Teilquader eine homogene Verteilung aufweisen und die Mittelung der Punktzahl ungenau wird. Die Frames, in denen im Witterungsanalysebereich keine Gegenstände detektiert wurden, stehen schließlich für die Abschätzung des Wetters zur Verfügung. Hierfür wird die Punktmenge im Witterungsbeobachtungsgebiet ermittelt und über die letzten 600 Frames gemittelt. Der realisierte Programmcode der Niederschlagserkennung trägt den Dateinamen *raindropsNoiseCount.m*.

5 Auswertung

5.1 Messergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen werden in diesem Abschnitt dargestellt und die untersuchten Umfedeinflüsse separat voneinander ausgewertet. Parallel wird erläutert, weshalb Kennzeichen nicht als Referenzobjekte für eine Witterungs- oder Verschmutzungs-erkennung geeignet sind.

5.1.1 Typisierung der Häufigkeitsverteilung

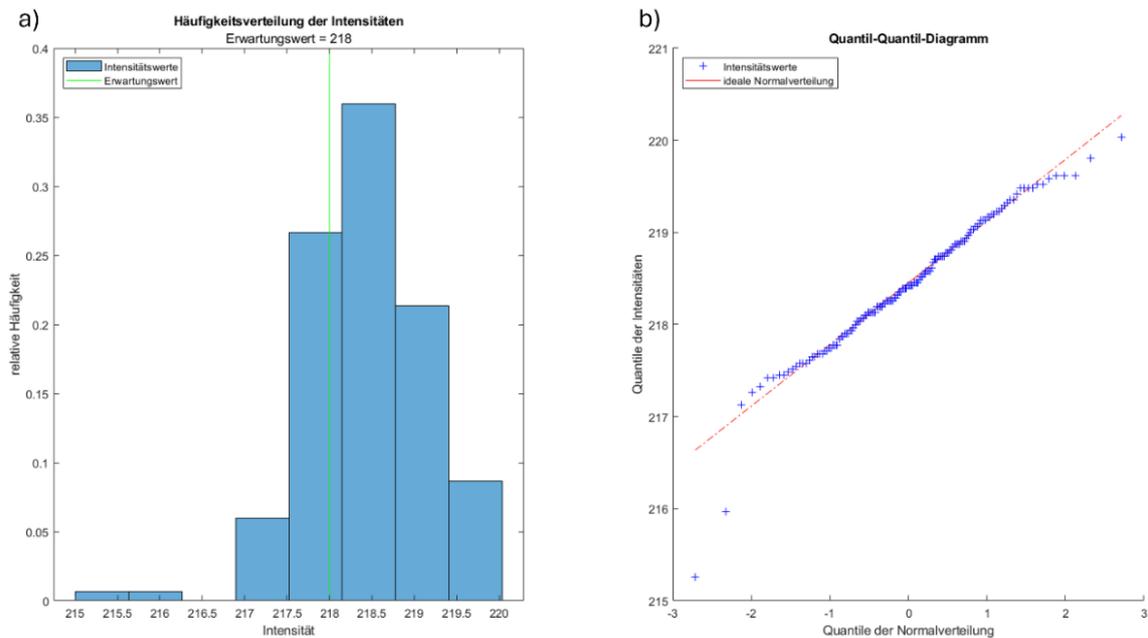


Abbildung 5.1: Analyse der Häufigkeitsverteilung der Intensitätswerte einer Messung (Leishen LS128S2),

a) Histogramm, b) Quantil-Quantil-Diagramm

Abbildung 5.1 visualisiert die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Intensitäten im Histogramm (a) für eine Messung des Leishen LS128S2. Die Intensitätswerte der Punkte eines Kennzeichens werden pro Frame gemittelt, sodass für jedes Kennzeichen in einem Frame ein Intensitätswert zur Verfügung steht. Diese Mittelwertbildung ist notwendig, da ansonsten einige Abtastungen, in denen wenig Laserstrahlen von dem Nummernschild reflektiert werden, einen geringeren Einfluss auf die Häufigkeitsverteilung hätten als die Punktwolken, mit hoher Punktdichte im Bereich des Kennzeichens. Um eine präzise allgemeingültige Schlussfolgerung bezüglich des Erwartungswertes zu erzielen, gibt es einige grundlegende Regeln, die bei der Verteilungsanalyse beachtet werden müssen.

Zum einen ist für die geeignete visuelle Auswertung der Verteilungsgestalt im Histogramm die Anzahl der Balken von Bedeutung. Hierfür wird der Wertebereich mit der Sturges-Regel in äquivalente Intervalle unterteilt. Diese Anzahl der Balken k wird in Abhängigkeit der Stichprobengröße N ermittelt:

$$k = 1 + \log_2(N) = 1 + \log_2(100) = 7,64 \approx 8 \quad (5.1)$$

Voraussetzung für die Anwendung dieser Gleichung ist zum einen die Erfüllung der Bedingung $N < 200$. Die Messdauer beträgt für jede Messung 15 Sekunden. Bei einer Frequenz von 10 bis 20 Hz werden daher pro LiDAR 150 bis 300 Punktwolken aufgenommen. In der Realität sind bei paralleler Messung der drei Sensoren aber nur 100 bis 150 Punktwolken zu erwarten. Die Stichprobengröße N wird daher auf $N = 100$ festgelegt.

Des Weiteren muss neben der Stichprobengröße die Art der Häufigkeitsverteilung beachtet werden. Diese muss einer Normalverteilung entsprechen oder ähneln. Um zu validieren, ob es sich um eine Normalverteilung handelt, gibt es viele Möglichkeiten. Es ist in der Statistik üblich den Shapiro-Wilk-Test zu verwenden. Um jedoch eine Schätzung der Nullhypothese zu umgehen, wird der Vergleich mit der Normalverteilung über eine Quantil-Quantil-Darstellung realisiert (siehe Abbildung 5.1, b). Je näher die blau markierten Quantile an der roten Geraden liegen, desto mehr nähert sich die reale Häufigkeitsverteilung einer idealen Normalverteilung an. Für diese sogenannte Gauß-Verteilung ist charakteristisch, dass sich die Zufallsgrößen symmetrisch um den Erwartungswert μ verteilen. Dies ist für das dargestellte Histogramm (siehe Abbildung 5.1, a) nicht eindeutig zutreffend. Die Abweichungen sind vermutlich auf Sensorrauschen zurückzuführen. Das Quantil-Quantil-Diagramm zeigt jedoch, dass der Verteilung der gemessenen Bestrahlungsstärkewerte eine Normalverteilung zugrunde liegt.

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke E von den Umfeldbedingungen werden objektive Indikatoren für die Bewertung der Verteilungen verwendet:

Tabelle 5.1: analysierte statistische Kenngrößen

statistische Kenngrößen	Bedeutung	Formel
Erwartungswert	durchschnittlicher Wert	$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$
Modalwert	häufigster Wert	
Standardabweichung	Streuung um den Erwartungswert	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - \mu)^2}$
Spannweite	Differenz zwischen kleinstem und größtem Wert	$W = E_{max} - E_{min}$

Interquartilsabstand	Streuung der mittleren 50% der Werte	$IQR = Q_3 - Q_1$
Schiefe	Asymmetrie um Erwartungswert	$\gamma_m = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i - \mu}{\sigma} \right)^3$
Kurtosis	Spitzigkeit (Wölbung)	$\hat{\omega} = \frac{N(N+1)}{(N-1)(N-2)(N-3)} \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i - \mu}{\sigma} \right)^3$
Anteil Ausreißer	Anzahl Werte außerhalb der dreifachen Standardabweichung bezogen auf Stichprobengröße	$\mu + 3\sigma \geq E_i \geq \mu - 3\sigma$

In der Tabelle 5.1 ist die Auswahl der relevanten Merkmale zur Untersuchung der Häufigkeitsverteilungen zusammengefasst. Die Größe E_i repräsentiert die Zufallsvariable. In diesem Anwendungsfall entspricht sie dem Mittelwert der gemessenen Bestrahlungsstärke der Kennzeichenreflexionspunkte eines Frames. Die Berechnung der statistischen Kenngrößen für jede Messung erfolgt dem Matlab-Skript *visualInt.m*.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der untersuchten Umfeldeinflüsse abschnittsweise ausgewertet.

5.1.2 Objektentfernung

Aus den Beugungs- und Streuungseigenschaften des Laserlichts ging hervor, dass die Bestrahlungsstärke stark von der Objektentfernung abhängig ist (siehe Gleichung 2.4). Dieser Zusammenhang soll untersucht werden, indem dasselbe Kennzeichen in verschiedenen Entfernungen von 10 bis 30 m platziert wird (Kamerabilder siehe Anlagen, Abbildung E.1).

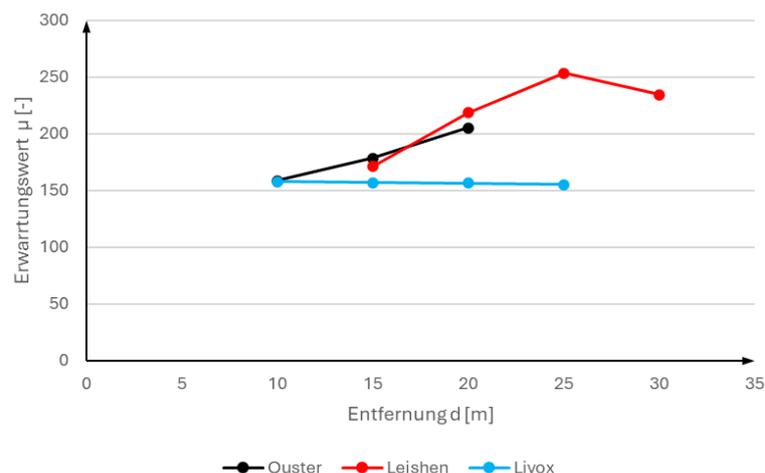


Abbildung 5.2: Erwartungswert in Abhängigkeit der Kennzeichenentfernung

Die Abbildung 5.2 stellt den Erwartungswert der Bestrahlungsstärke (Durchschnittswert der Häufigkeitsverteilung) über der Entfernung dar. Die Einheit der gemessenen Bestrahlungsstärke wird nicht wie in der Physik üblich in $\frac{W}{m^2}$ angegeben. Im Abschnitt 2.3.2 wurde bereits erläutert, weshalb in dieser Arbeit die Angabe der gemessenen Bestrahlungsstärke dimensionslos erfolgt.

Entgegen den Vermutungen ist in den Messdaten der Ebenenscanner Ouster OS1 und Leishen LS128S2 (siehe Abbildung 5.2) kein abfallender Trend der Bestrahlungsstärke infolge höherer Objektentfernungen erkennbar. Die Datenpunkte des Livox Horizon weichen zwar ebenfalls von der vorhergesagten quadratischen Kennlinie (siehe Formel 2.5) ab. Jedoch ist ein leicht abfallender Trend mit steigender Entfernung ersichtlich. Für die anderen untersuchten stochastischen Kenngrößen wurde für keinen Sensor eine reproduzierbare Abhängigkeit von der Objektentfernung gefunden (siehe Anlagen, Abbildung E.2). Daher wird in den folgenden Teilversuchen der qualitative Verlauf der Graphen nicht weiter untersucht. Stattdessen ist zu prüfen, ob durch andere Umfeldbedingungen ähnliche Größendimensionen in den statistischen Kenngrößen erzielt werden.

5.1.3 Verwitterung des Kennzeichens

Die Reflexionseigenschaften des Retroreflektors werden beeinflusst, indem der Alterungsgrad beziehungsweise die Verschmutzung verändert wird.

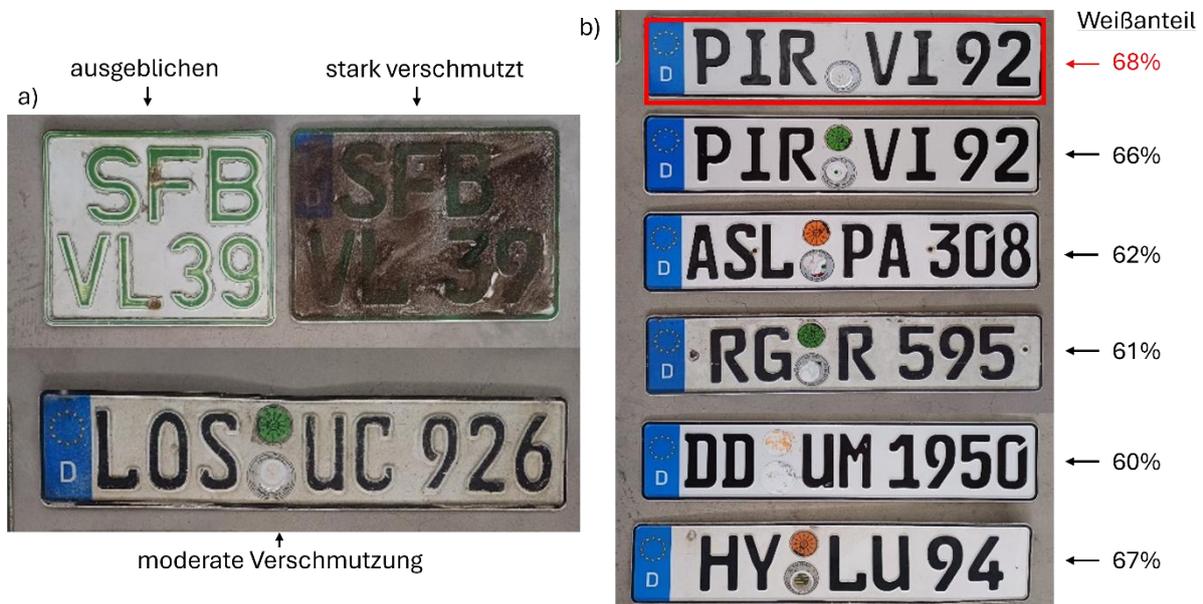


Abbildung 5.3: verfügbare Kennzeichen, a) verschiedene Verwitterungszustände, b) Auswahl des Kennzeichens mit höchster Reflektivität

In der Abbildung 5.3 sind die für die Messung verfügbaren Kennzeichen dargestellt. Anhand des stark verschmutzten Kennzeichens (a) soll überprüft werden, ob die Kennzeichendetektion für einen solchen eher unrealistischen Extremfall (minimale Reflektivität R)

erfolgreich ist. Das durch Sonneneinstrahlung ausgebleichene Nummernschild (a) soll aufzeigen, inwieweit das Reflexionsvermögen der Retroreflexfolie vermindert wurde. Des Weiteren wird ein Kennzeichen mit einer sehr dünnen Sandschicht versehen (a, moderate Verschmutzung). Diese soll eine reale Verschmutzung widerspiegeln. Für die Verwitterungs- beziehungsweise Verschmutzungszustände wird geprüft, ob sich das Kennzeichen hinsichtlich der Reflexionseigenschaften von dem Rest des Fahrzeugs abhebt. Ist dies nicht der Fall ist die Kennzeichenerkennung für diese Exemplare nicht möglich. Des Weiteren wird die Häufigkeitsverteilung der Mittelwerte je Frame analysiert.

Um den anderen Extremfall (maximale Reflektivität R) zu realisieren, wurden zahlreiche Kennzeichen bereitgestellt, die maximal fünf Jahre alt sind und daher gute Reflexionswerte aufweisen (b). Die unterschiedlichen Bedruckungen bewirken einen variierenden Schwarz-Weiß- Anteil. Da ausschließlich der unbedruckte Kennzeichenbereich die Retroreflexeigenschaften besitzt, wird für die Erzielung eines möglichst hohen Intensitätsmittelwertes das Kennzeichen mit dem höchsten Weiß-Anteil gesucht.

Zuerst werden die Kennzeichen aus Abbildung 5.3 (b) voneinander separiert und anschließend auf ein einheitliches Format zugeschnitten. Hierbei wird der blaue Reflexfolienanteil entfernt, da dieser unabhängig von der Bedruckung, für jedes Kennzeichen ein ähnliches Reflexionsvermögen aufweist. Anschließend wird mit der entwickelten Bildverarbeitung, die zusätzlich für die Quantifizierung der Folienschmutzung angewendet wurde (siehe Abschnitt 4.3.1), der Anteil weißer Pixel ins Verhältnis zu den restlichen Pixeln gesetzt.



Abbildung 5.4: schrittweise Umwandlung des zugeschnittenen Farbbildes in ein Schwarz-Weiß-Bild

Die Retroreflexfolie befindet sich nicht an den weißen Stellen, die durch das Entfernen der Prüfplaketten entstanden sind. Um dennoch ein gültiges Ergebnis zu erzielen, werden diese Bereiche künstlich geschwärzt (siehe Abbildung 5.4, schwarze gefüllte Kreise). Das abgebildete Kennzeichen weist mit 68 % den höchsten Weiß-Anteil auf und wird daher für die Messung ausgewählt. Schlussendlich werden folgende vier Kennzeichen für die Intensitätsuntersuchung verwendet:

$RK = 1$: starke Verschmutzung

$RK = 3$: moderate Verschmutzung

$RK = 2$: ausgebleichen

$RK = 4$: Neuzustand

Die vier Versuchskörper sind aufsteigend nach ihrem zu erwartenden Reflexionsvermögen geordnet. Die Reflektivitätskennziffer RK wurde lediglich für die Erstellung des folgenden Diagramms eingeführt. Es besteht keine Forderung nach einer Proportionalität zwischen der Kennzahl RK und der tatsächlichen Reflektivität. Denn das Ziel dieser Teiluntersuchung

ist es, zu überprüfen, ob die Reflektivität der Kennzeichen trotz verschiedener Zustände in einem geringen Maß schwankt. Diese Annahme wurde bei der Konzeptentwicklung (siehe Anlage A) getroffen, indem die Reflektivität R in der Formel 2.5 als nahezu konstant angenommen wurde. Ein Trend wird nicht gesucht, da die Objektreflektivität R für den Laserscanner unbekannt ist und daher keine Proportionalität genutzt werden kann.

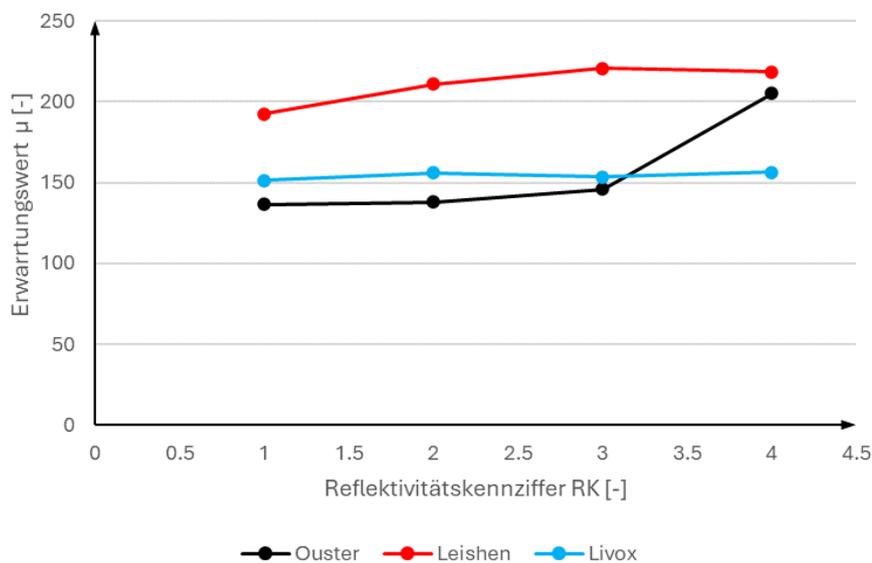


Abbildung 5.5: Erwartungswert in Abhängigkeit des Kennzeichenzustands

In Abbildung 5.5 ist die Abhängigkeit des Erwartungswertes der gemessenen mittleren Bestrahlungsstärke einer Messung von dem Kennzeichenzustand dargestellt. Der Ouster OS1 und der Leishen LS128S2 weichen von der Annahme ab, dass verschiedene Verwitterungszustände einen nahezu konstanten Erwartungswert verursachen. Für diese beiden Scanner wird im weiteren Verlauf überprüft, ob es durch eine Verschmutzung eventuell drastische quantitative Änderungen im Erwartungswert gibt. Lediglich der Livox Horizon liefert eine Kennlinie, die den Annahmen entspricht.

Für die ebenfalls berechneten stochastischen Kenngrößen wurde erkannt, dass sowohl für die Objektentfernung als auch für die Kennzeichenreflektivitäten nur der Ouster OS1 mit dem Schiefe-Kennwert und dem Anteil an Ausreißern einen reproduzierbaren Verlauf aufweist. (siehe Anlagen, Abbildung E.4 und Abbildung E.5). Die beiden Wertegrößen sind unabhängig von der untersuchten Umfeldbedingung ungefähr null. Die anderen Referenzgrößen zeigten bereits bei der Untersuchung des Entfernungseinflusses desselben Kennzeichens keinen nachvollziehbaren qualitativen Verlauf. Im Rahmen der Analyse der Kennzeichenreflektivität wurde festgestellt, dass diese statistischen Kenngrößen darüber hinaus nicht in einer reproduzierbaren Größendimension schwanken. Für die weiteren Untersuchungen wird daher ausschließlich der Erwartungswert für jeden Scanner sowie die Schiefe-Kennzahl und der Ausreißeranteil für den Ouster OS1 berechnet.

5.1.4 Einfallswinkel

Die Gründe für die Untersuchung des Einfallswinkels sind die winkelabhängigen Mindestanforderungen der Reflexionswerte der Retroreflexfolie. Zudem wird geprüft, ob ein Grenzwinkel α_G existiert, für den die Retroreflexion nicht aufrechterhalten werden kann. Für diesen Fall wäre die Kennzeichenerkennung nicht mehr möglich. Des Weiteren wird für die Vorhersage der Bestrahlungsstärke weiterhin eine Anhaltsgröße gesucht, mit der Verschmutzungen beziehungsweise Wetterbedingungen erkannt werden.

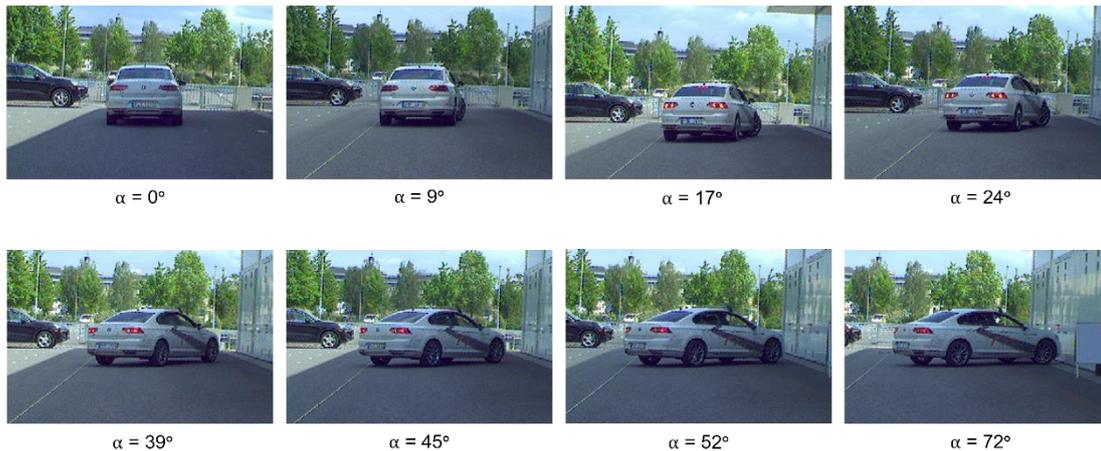


Abbildung 5.6: Variation des Einfallswinkels

Abbildung 5.6 fasst die Varianten des Einfallswinkels zusammen. Der Winkel α in der x-y-Ebene, den das Lot der Kennzeichenebene mit der optischen Achse des Lasers beziehungsweise der Abszisse (x-Achse) des Koordinatensystems einschließt, beträgt für ein gerade beziehungsweise parallel zur optischen Achse ausgerichtetes Fahrzeug $\alpha = 0^\circ$. Ein Winkel von $\alpha > 90^\circ$ bedeutet, dass dieses Kennzeichen nicht vom Laserlicht getroffen wird, weshalb es nicht detektiert werden kann. Im folgenden Versuchsteil wird der sichtbare Bereich zwischen $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ untersucht. Dabei ist es für die Reflexionscharakteristik unerheblich, ob sich der Einfallsstrahl links- oder rechtsseitig von dem Lot befindet. Aufgrund dieser Symmetrie wird der Einfallswinkel ausschließlich durch verschiedene rechtsseitige Schrägstellungen des Zielfahrzeugs variiert. Aus Zeitgründen konnte der Winkelbereich nicht in äquivalente Intervalle geteilt werden. Die Messung der einzelnen Einfallswinkel erfolgt nachträglich in der Punktwolke.

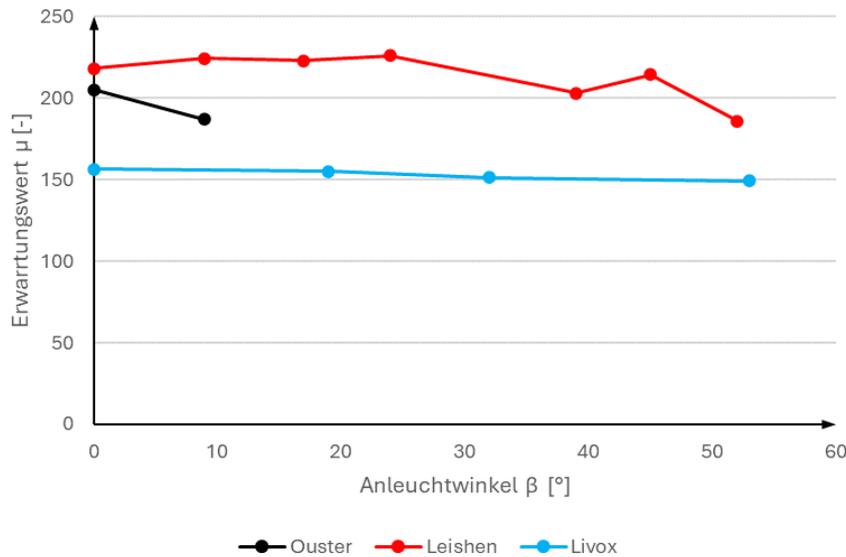


Abbildung 5.7: Abhängigkeit des Erwartungswertes vom Einfallswinkel

Abbildung 5.7 stellt den Zusammenhang zwischen der Bestrahlungsstärke und dem Einfallswinkel α dar. Es ist zu sehen, dass die Kennzeichenerkennung mithilfe des Ousters bereits bei etwas schräger Ausrichtung ab circa $|\alpha| > 10^\circ$ nicht mehr funktioniert. Für die anderen Scanner liegt der Grenzwinkel bei $|\alpha_G| \approx 55^\circ$. Oberhalb dieser Schwelle dient das Kennzeichen nicht mehr als Retroreflektor. Es kann daher nicht mehr aufgrund des Reflexionsvermögens von der Fahrzeuglackierung unterschieden werden. Der geringfügige Rückgang in den Graphen beweist, dass das Blechschild mit einer Glasperlen-Reflexfolie beklebt wurde. Der plötzliche Abfall der Kennlinie des Leishen LS128S2 bei einem Einfallswinkel von $\alpha \approx 30^\circ$ korreliert mit den Vorgaben aus der DIN 67520, die eine Verminderung der Reflektivität infolge schräger Anleuchtung von $\alpha \geq 30^\circ$ erlaubt (siehe Abschnitt 2.5.3).

Die ebenfalls analysierten statistischen Kenngrößen (siehe Anlagen, Abbildung E.6) weisen für den Ouster OS1 erneut sehr kleine Werte auf. Weshalb diese Referenzwerte in den verbleibenden Teilversuchen weiterhin betrachtet werden.

5.1.5 Verschmutzung Sensorscheibe

Die folgende Messauswertung hat das Ziel, im Vergleich zu den bereits untersuchten Bedingungen im sauberen Zustand der Sensorscheibe, Abweichungen der Kennlinien beziehungsweise der Größendimension infolge der Verschmutzung der Sensorscheiben zu ermitteln. Die analysierten Szenarien wurden mithilfe von Kamerabildern dokumentiert (siehe Anlagen, Abbildung E.7).

Durch die Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren mit sauberen Sensorscheiben hat sich gezeigt, dass der Schiefe-Wert sowie der Ausreißeranteil für den Ouster OS1 unabhängig von den Umfeldbedingungen im Nullbereich liegen. Der Erwartungswert der Häufigkeitsverteilung schwankt für diesen LiDAR zwischen $130 \leq \mu \leq 210$. Die gemessene

Bestrahlungsstärke des Leishen LS128S2 variiert im Mittel zwischen $170 \leq \mu \leq 260$. Ausschließlich der Livox Horizon konnte die Vorhersagen bestätigen. Dieser weist für den Erwartungswert eine flach abfallende Kennlinie in Abhängigkeit der Objektdistanz beziehungsweise des Einfallswinkels auf. Des Weiteren ist die gemessene Intensität im Durchschnitt nahezu konstant für verschiedene Kennzeichenverwitterungen. Insgesamt wurden für diesen nicht-repetitiven-Laserscanner ohne Verschmutzung nur sehr geringe Schwankungen im Bereich von $150 \leq \mu \leq 160$ registriert.

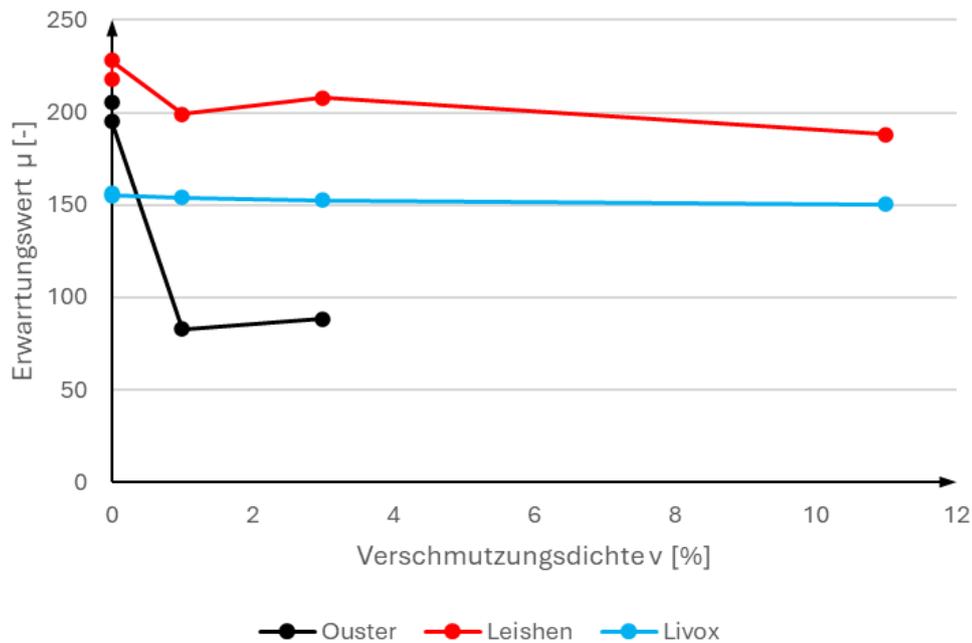


Abbildung 5.8: Abhängigkeit des Erwartungswerts von der Verschmutzungsdichte

Abbildung 5.8 visualisiert den Zusammenhang zwischen den Erwartungswerten der Häufigkeitsverteilungen und den Verschmutzungsdichte. Die Berechnung der Verschmutzungsdichte v wurde bereits im Rahmen der Verschmutzungserkennung erläutert (siehe Abschnitt 4.3.1).

Die zwei Messpunkte, die je Sensor für die Verschmutzungsdichte $v = 0$ dargestellt sind repräsentieren den sauberen Zustand ohne beziehungsweise mit Folie und Klebstoff. Hierdurch soll aufgezeigt werden, dass das Trägermaterial keinen nennenswerten Einfluss auf die Messergebnisse nimmt. Dies bestätigt die theoretische Vorbetrachtung, in der bereits festgestellt wurde, dass der Strahlöffnungswinkel eines Laserstrahls auch nach dem Durchqueren einer Optik durch die Gleichung 2.2 beschrieben wird.

Entgegen den Erwartungen im Grundkonzept (siehe Anlage A) weist der Livox Horizon kaum einen Rückgang der Bestrahlungsstärke auf. Auch der Leishen LS128S2 zeigt keine Änderungen im Vergleich zu den Werten im unverschmutzten Zustand. Ausschließlich der Ouster OS1 verzeichnet einen Rückgang der Kennzeichenintensität. Schon bei der geringen natürlichen Verschmutzung, die einer Verschmutzungsdichte von $v \approx 1$ % entspricht,

liegt der Erwartungswert der gemessenen Intensitätswerte unterhalb des Bereichs ($130 \leq \mu \leq 210$), in welchem die Intensitätsmittelwerte im sauberen Zustand variieren. Dennoch führen die erheblichen Schwankungen in den Ouster-Messdaten dazu, dass keine Proportionalität zwischen der Verschmutzungsstärke und dem Erwartungswert zu erkennen ist. Auch die statistischen Kenngrößen, die für die betrachteten Umfeldbedingungen (Kennzeichenentfernung und -reflektivität sowie Strahleinfallswinkel) plausible Werte lieferten, weisen für die Verschmutzungsmessung keinen nachvollziehbaren Zusammenhang auf, mit dem eine sichere Erkennung einer verschmutzten Sensorscheibe möglich ist.

Diese Ergebnisse führten zu dem Schluss, dass das Konzept, welches die Erkennung einer verschmutzten Sensorscheibe aufgrund von der Abweichung der vorhergesagten Kennlinie vorsieht, verworfen wird. Im Rahmen der Verschmutzungserkennung wurde jedoch eine robuste Lösung gefunden, die eine differenzierte Aussage über die Verwitterung des Laserscanners zulässt (siehe Abschnitt 4.3).

5.1.6 Witterung

Im Rahmen der Entwicklung der Witterungserkennung wurden Messungen analysiert, die von Herrn Prof. Trautmann aufgenommen wurden [22]. Die Ergebnisse werden nachfolgend ausgewertet. Das Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung einer Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke von der Witterung.



Abbildung 5.9: statisches Szenario der Witterungsmessungen [22]

Abbildung 5.9 zeigt die Positionierung der Fahrzeuge, deren Kennzeichenreflektivitäten in Abhängigkeit der Witterung analysiert werden. Es wurden folgende Wetterverhältnisse aufgenommen:

- kein Niederschlag
- Regen
- Schneeregen

Für die Auswertung wird der Niederschlag in die Klassen Regen und Schneeregen gegliedert. Innerhalb dieser Klassen erfolgt eine Differenzierung anhand der Niederschlagsintensität. Diese ist definiert als Niederschlagsmenge, die auf einem Quadratmeter Fläche pro Stunde fällt.

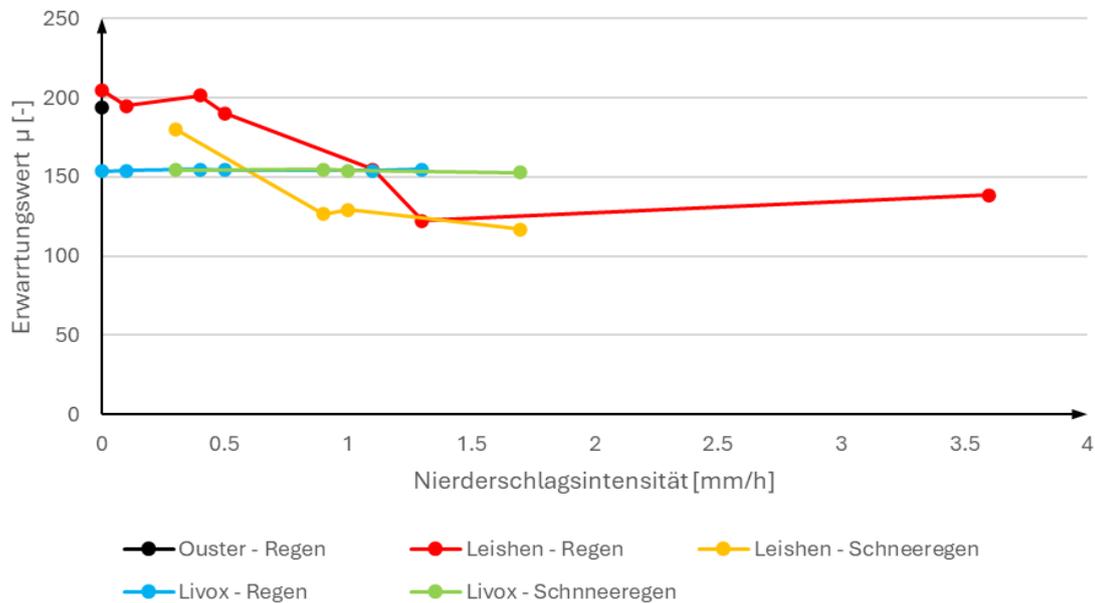


Abbildung 5.10: Abhängigkeit des Erwartungswertes von der Niederschlagsmenge

Abbildung 5.10 visualisiert den Zusammenhang zwischen der Niederschlagsintensität und dem Erwartungswert, der aus den gemessenen Bestrahlungsstärkewerten der vom Kennzeichen reflektierten Laserpulse hervorgeht. Der Ouster OS1 konnte ähnlich wie bei den Verschmutzungsmessungen bereits bei schwachem Niederschlag die Kennzeichen nicht von den Fahrzeugen trennen, da die einzelnen Intensitätswerte, die sich auf dem Nummernschild befinden sehr stark schwanken. Daher befinden sich bei Regen oder Schneeregen nur ein bis zwei Punkte auf dem Kennzeichen, die oberhalb der Intensitätsschwelle liegen. Aus diesem Grund werden für den 360°-Rotations-Scanner die alternativen statistischen Kenngrößen (Schiefe und Ausreißeranteil) nicht berechnet. Der Livox Horizon weist wie in den anderen Teilversuchen einen nahezu konstanten Erwartungswert im Bereich von $150 \leq \mu \leq 160$ auf. Die gemessene Bestrahlungsstärke dieses optischen Messmittels scheint nahezu unabhängig von der Umgebungskondition zu sein. Die Graphen des Leishen LS128S2 zeichnen sich dahingegen erneut durch hohe Schwankungen aus. Diese liegen in ähnlichen Größendimension wie bei trockenen Verhältnissen.

Für verschiedene Witterungsbedingungen konnten keine Auffälligkeiten in den Intensitätsinformationen gefunden werden. Infolgedessen wurde das Konzept (siehe Anlage A), welches auf der Vorhersage des Rückgangs der Bestrahlungsstärke beruht, sowohl für die Verschmutzungs- als auch die Kennzeichenerkennung verworfen. Für die Abschätzung der Witterung wurde daher ein alternativer Algorithmus präsentiert, der eine differenzierte Ein-

ordnung des Wetters ermöglicht (siehe Abschnitt 5.1.6).

5.1.7 Geschwindigkeit

Dieser Einflussfaktor wird im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit nicht beleuchtet. Da die Fahrzeuggeschwindigkeiten gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sehr klein sind, ist der Einfluss des Doppler-Effekts vernachlässigbar. Dieser beschreibt die Änderung der Wellenlänge durch die Relativbewegung von Sender beziehungsweise Empfänger. Dadurch ist auch keine Veränderung der Intensität von der Geschwindigkeit zu erwarten.

5.2 Validierung der Kennzeichenerkennung

Mit der Messauswertung im vorangegangenen Abschnitt wurde einerseits aufgezeigt, dass eine Verschmutzungs- und Witterungserkennung nicht umsetzbar ist, wenn die messbare Kennzeichenbestrahlungsstärke oder andere statistische Kenngrößen als Referenzwert verwendet werden. Des Weiteren wurden einige Extremsituationen realisiert, um die Grenzen der entwickelten Kennzeichenerkennung aufzeigen zu können. Bei der Leistungseinschätzung wird folgende Unterteilung vorgenommen:

Tabelle 5.2: Begriffe für die Leistungsbewertung der Kennzeichenerkennung

	Kennzeichenexistenz	Kennzeichenerkennung
True Positive	Ja	Ja
True Negative	Nein	Nein
False Positive	Nein	Ja
False Negative	Ja	Nein

Ein Frame wurde erfolgreich verarbeitet, wenn der Zustand True Positive (Treffer) oder True Negative (korrekte Ablehnung) eintritt.

Im Teilversuch zur Untersuchung der Objektentfernung zeigte der Ouster OS 1 aufgrund seiner groben Auflösung, dass die Kennzeichenerkennung in Entfernungen $d > 20 m$ kaum noch möglich ist. Dieses Ergebnis wurde bereits im Rahmen der Herleitung der sensorspezifischen Entfernungsgrenzwerte prognostiziert (siehe Tabelle 4.2). Hierbei wurde aufgezeigt, dass in einer Entfernung des Kennzeichens von $d > 9 m$ eine ungünstige Punktlage zu einem False Negative-Fehlerfall führen kann. Die anderen beiden Umfeldsensoren ermöglichten eine Detektion für jede Position des Zielobjekts in dem Beobachtungsbereich.

Die Messauswertung hinsichtlich der Verwitterung des Kennzeichens zeigte entgegen den Erwartungen, dass die Kennzeichenerkennung selbst für stark verschmutzte beziehungsweise verblichene Retroreflektoren erfolgreich ist. Die Variation des Strahleinfallswinkels

fürte zu dem Ergebnis, dass der Ouster OS1 bereits für $\alpha > 10^\circ$ das Kennzeichen nicht aufgrund der gemessenen Bestrahlungsstärke von dem Trägerfahrzeug trennen kann. Wird der Algorithmus auf die Messdaten des Livox Horizon oder des Leishen LS128S2 angewendet, ist eine Sondierung des Kennzeichens bis zu einem Grenzwinkel von $\alpha_G \approx 55^\circ$ möglich.

Im Teilversuch, der sich mit der Verschmutzung an der Sensorscheibe beschäftigt, wurde erneut für den Mehrzeilenscanner der Firma Ouster Inc. die schlechteste Eignung für die Kennzeichendetektion festgestellt. Während die anderen beiden Umfeldsensoren selbst bei sandigen Ablagerungen ($v \approx 11\%$) eine Detektion des Blechschildes ermöglichen, dürfen auf der Sensorscheibe des Ousters höchstens Verschmutzungen auftreten, die einer dünnen Pollenschicht ähneln. Dies resultiert nicht aus einer stark reduzierten Punktzahl, sondern aus einer stark erhöhten Messunsicherheit der Bestrahlungsstärke.

Das Wetter hat auf die Erfolgsquote der Kennzeichenerkennung den größten Einfluss. Der Ouster OS1 kann beispielsweise schon bei schwachem Regen kaum die Kennzeichen segmentieren. Die anderen Sensoren reagieren robuster auf Niederschlagsereignisse. Allerdings führt Schneeregen in jedem Fall zur Verminderung der Intensität, der vom Kennzeichen reflektierten Laserpulse, was die Erkennungsrate drastisch reduziert.

Abschließend werden die Laserscanner hinsichtlich ihrer Trefferquote miteinander verglichen. Hierfür wird ein dynamisches Szenario genutzt, in dem vier Fahrzeuge nacheinander durch das Sichtfeld der drei Laserscanner fahren. Da die Zählung der Anzahl der korrekten und fehlerhaften Detektionen händisch erfolgt, wird der Betrachtungszeitraum auf den Abschnitt zwischen dem Einfahren des ersten Fahrzeugs bis zum Ausfahren des zweiten Fahrzeugs beschränkt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Teststrecke und die beiden betrachteten Versuchsfahrzeuge.

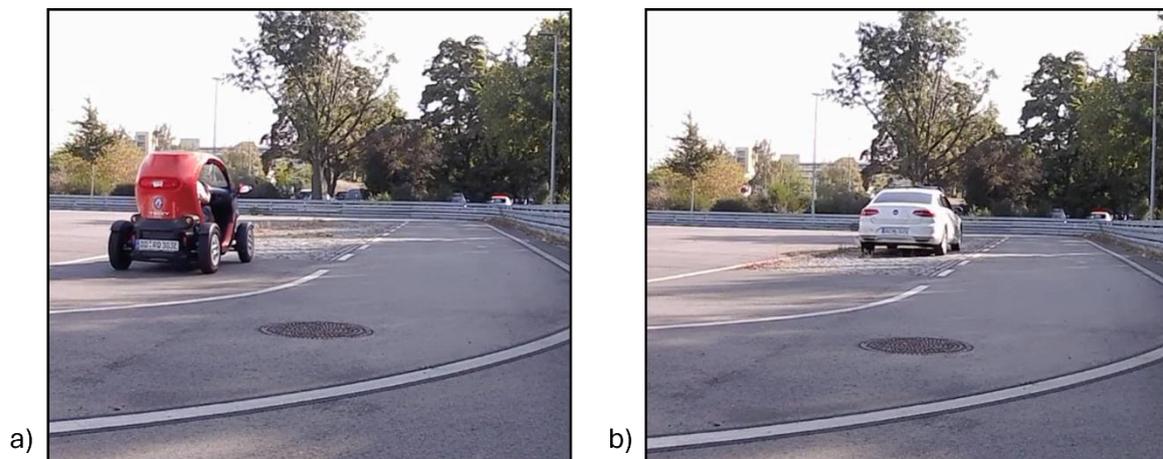


Abbildung 5.11: dynamische Messung zur Validierung der Kennzeichenerkennung , a) Start-, b) Endzeitpunkt

Abbildung 5.11 visualisiert den Startzeitpunkt (a) der Referenzmessung, in welchem das erste Zielfahrzeug in den Beobachtungsquader (siehe Abschnitt 4.2.1) einfährt. Außerdem ist die Momentaufnahme des Endzeitpunkts (b) ersichtlich.

Aufgrund der verschiedenen Scanraten ist eine Auswertung der absoluten Ergebniswerte nicht sinnvoll. Daher wurden folgende allgemeingültige Quoten berechnet:

Mithilfe der **Vollständigkeitsquote** (engl. *Recall*) wird die Anzahl der korrekt erkannten Scans auf die Gesamtanzahl der Frames bezogen, in der Kennzeichen zu finden sind. Daher gilt:

$$Recall = \frac{Anzahl\ True\ Positives}{Anzahl\ True\ Positives + Anzahl\ False\ Negatives} \quad (5.2)$$

Dahingegen berücksichtigt die **Genauigkeitsquote** auch Fehldetektionen mithilfe der folgenden Gleichung:

$$Precision = \frac{Anzahl\ True\ Positives}{Anzahl\ True\ Positives + Anzahl\ False\ Positives} \quad (5.3)$$

Die Ergebnisse der Validierung der Kennzeichenerkennung sind in folgender Tabelle ersichtlich.

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Validierung der Kennzeichenerkennung

	Ouster OS1	Leishen LS128S2	Livox Horizon
True Positive	21	29	52
True Negative	12	2	19
False Positive	0	4	1
False Negative	256	230	447
Recall	0,64	0,94	0,73
Precision	1	0,88	0,98

Bei Betrachtung der Vollständigkeitsquote wird deutlich, dass der Leishen LS128S2 aufgrund der dichten Punktverteilung nahezu alle Kennzeichen erkennt (*Recall* = 0,94). Die schlechtere Quote des Ouster OS1 (*Recall* = 0,64) ist auf die grobe vertikale Auflösung zurückzuführen. Dahingegen muss beachtet werden, dass dieser Mehrzeilenscanner keine falschen Objekte als Kennzeichen klassifiziert (*Precision* = 1). Die Bewertungen des Livox Horizon reihen sich zwischen den beiden Mehrzeilenscannern ein. Eine Fehldetektion (False Positive) kann auftreten, wenn die Messunsicherheit der Bestrahlungsstärke dazu führt, dass mehreren benachbarten Punkten innerhalb eines Frames hohe Intensitätswerte

zugeordnet werden. Ferner besitzen jegliche Messpunkte auf der optischen Achse vergleichsweise hohe Intensitätswerte. Weist die Punkthäufung zudem kennzeichenähnliche Abmessungen auf und liegt in der ROI des CropBox-Filters sowie oberhalb der Bodenebene, schließt der Algorithmus auf die Existenz eines Kennzeichens, wenn darüber hinaus das Trägerobjekt in der Höhe und Breite nicht von einem Fahrzeug zu unterscheiden ist. Solche kennzeichenähnlichen Cluster entstehen vorrangig an Objekten wie beispielsweise Leitplanken, die hinsichtlich der Reflektivität knapp unter der Schwelle des Intensitätsfilters liegen.

5.3 Validierung der Störungserkennungen

Die Messungen mit verschiedenen **Verschmutzungen** haben gezeigt, dass der Ouster OS1 stärker als die anderen Sensoren von Ablagerungen an der Scheibe beeinflusst wird. Aus diesem Grund wäre es möglicherweise sinnvoll, auf eine einheitliche Einteilung der Verschmutzung zu verzichten und für den 360°-Laserscanner schon bei geringen Verunreinigungen eine Warnung auszugeben. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die hohe Messunsicherheit der Bestrahlungsstärke dazu führt, dass keine Kennzeichen detektiert werden können. Andere Objekterkennungen, die ohne die Information der Bestrahlungsstärke auskommen, könnten daher auch mit höheren Ablagerungen auf der Sensorscheibe funktionieren. Aus diesem Grund wird an der Abstufung anhand der Punktzahl beziehungsweise der Sichtbarkeit der Objekte in der Punktwolke festgehalten. Da der Algorithmus anhand des vorgestellten Szenarios entwickelt wurde, ist eine Leistungsbewertung anhand dieser Messungen nicht zweckmäßig. Das Gleiche gilt für die **Witterungserkennung**. Für eine allgemeingültige Validierung müssen daher alternative Versuche durchgeführt werden.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit erfolgte die Entwicklung und Umsetzung einer Kennzeichenerkennung. Hierbei wurde herausgefunden, dass in vorgefilterten Punktwolken, in denen sich die Punktcluster hinsichtlich ihrer Abstände unterscheiden, der reproduzierbare Strahlengang von Mehrzeilenscannern genutzt werden kann, um die Punktwolke zu segmentieren. Diese Methode konnte mithilfe eines VoxelGrid-Filters ebenso auf den Livox Horizon angewendet werden, der über ein nicht-repetitives Messverfahren verfügt. Für Folgearbeiten bleibt zu überprüfen, ob dieser deterministische Segmentierungsalgorithmus unter den genannten Bedingungen aufgrund des geringen Rechenaufwands konkurrenzfähig ist.

Die Validierung der Kennzeichenerkennung hat gezeigt, dass die vorgestellte Methode sensorspezifische Erkennungsquoten verursacht. Der Leishen LS128S2 detektierte die meisten Kennzeichen. Aufgrund seiner hohen Auflösung befinden sich auch in Entfernungen von $d > 25 \text{ m}$ genügend Messpunkte auf dem Nummernschild, um dieses zu detektieren. Des Weiteren verfügt er über ein enges vertikales Sichtfeld, wodurch wenig Messpunkte verworfen werden müssen, um den Fokus auf vorausfahrende Fahrzeuge zu legen. Aufgrund dessen eignet sich der Leishen LS128S2 am besten für die Kennzeichenerkennung. Die Anzahl der Fehlerkennungen liegt für alle drei Laserscanner in einem ähnlich niedrigen Bereich. Eine weitere Anpassung der Eingangsparameter der Filter könnte diese Ergebnisse weiter verbessern. Neben den überzeugenden Ergebnissen ist hervorzuheben, dass als Nebenprodukt der Kennzeichenerkennung die Segmentierung von Fahrzeugen gelang. In der Praxis wird die Klassifizierung von Fahrzeugen auf Grundlage der Kennzeichendetektion vermutlich nicht zur Anwendung kommen, da die Nummernschilder nicht in jeder Perspektive sichtbar sind. Grundsätzlich wurde mit der Kennzeichenerkennung ein performanter Algorithmus entwickelt, mit dem Kennzeichen als Referenzobjekte zuverlässig extrahiert werden können. In einer weiterführenden Arbeit sollte geprüft werden, ob die Verarbeitungsgeschwindigkeit für die Realisierung einer Echtzeitfähigkeit ausreicht. Alternativ könnte je nach Anwendungsfall zum Beispiel jeder zweite Frame verarbeitet oder statt des merkmalsbasierten Ansatzes ein neuronales Netz verwendet werden. Des Weiteren bleibt offen, ob das Konzept, welches sich auf deutsche Normen und Gesetze bezieht, sich auf Kennzeichen in anderen Nationen übertragen lässt. Erfahrungsgemäß sollte allerdings eine Anpassung der Schwellwerte für die Intensitäts- sowie für die Größenfilterung genügen, um auf Grundlage der spezifischen Vorschriften die Detektion von Kennzeichen zu ermöglichen.

Nach der Entwicklung des Kennzeichendetektionsalgorithmus fanden Messungen zur Untersuchung der Strahlintensität in Abhängigkeit ausgewählter Umfeldbedingungen statt. Mit

der Messauswertung im vorangegangenen Kapitel wurde einerseits aufgezeigt, dass eine Verschmutzungs- und Witterungserkennung nicht umsetzbar ist, wenn ausschließlich die messbare Kennzeichenbestrahlungsstärke als Richtwert verwendet wird. Denn schon für dasselbe Kennzeichen bei gleicher Entfernung existieren große Schwankungen der Bestrahlungsstärke. Auch mit einer Analyse der Häufigkeitsverteilung der Intensitätswerte lässt sich keine Abschätzung des Verschmutzungszustandes der Sensorscheibe realisieren. Aus diesem Grund wurde eine alternative Methode entwickelt, mit der eine Abschätzung des Verschmutzungsgrades möglich ist

Durch die Berücksichtigung von Nahbereichsreflexionen gelang die Entdeckung einer Logik, die unabhängig von den Umwelteinflüssen ist und keine Referenzobjekte benötigt. Der Algorithmus funktioniert zwar nur für Sensoren, die Informationen dieser Punkte abspeichern, doch aufgrund der unabhängigen Funktionsweise ist ein Einsatz ebenfalls in der Industrie denkbar. Denn allein das Zählen der Scheibenreflexionen ermöglicht eine robuste Einschätzung der Verschmutzung. Diese Approximation beschränkt sich jedoch im Detail auf die Berechnung der Verschmutzungsverteilungsdichte von lichtundurchlässigen Ablagerungen. Das impliziert, dass die Schichtdicke und die Brechzahl unberücksichtigt bleiben. Zudem wurde festgestellt, dass ebenso für transparente Verschmutzungsmedien, wie beispielsweise Wasser, eine Störung der LiDAR-Messung zu erwarten ist. Aus diesem Grund sollte die vorgestellte Logik als Grundlage für die weiterführende Entwicklung einer ganzheitlichen Verschmutzungserkennungsmethode verstanden werden.

Auf Grundlage der genannten Messergebnisse kann die Kennzeichenerkennung nicht für die Abschätzung der Witterung genutzt werden. Daher wurde auch für diese Anwendung ein alternatives unabhängiges Konzept erstellt und implementiert. Dieses umfasst sowohl die Analyse des Niederschlags als auch die Erkennung der Fahrbahnfeuchtigkeit. Durch einen nassen Bodenbelag wird weder das Messverfahren beeinflusst noch geht daraus eine eindeutige Schlussfolgerung auf gegenwärtigen Niederschlag hervor. Dennoch kann mithilfe der Erkennung von Spiegelungen eine erhöhte Schleudergefahr des Fahrzeugs vorhergesagt werden. Mithilfe von Fahrdynamiksensoren wie zum Beispiel Beschleunigungssensoren ist ausschließlich eine Erkennung eines beginnenden oder bereits bestehenden kritischen Fahrzustands möglich. Da in den Witterungsmessungen ausnahmslos eine homogene Feuchtigkeitsverteilung auf der Fahrbahn aufgenommen wurde, bedarf es einer weiteren Prüfung, in der auch partielle Wasseransammlungen auf der Bodenebene berücksichtigt werden.

In der Niederschlagserkennung erfolgte lediglich eine Unterscheidung zwischen den Witterungszuständen Schneeregen, Regen und kein Niederschlag. Relevante Störeinflüsse, die infolge Nebel oder reinen Schneefall entstehen, werden nicht berücksichtigt. Die Kennlinien ließen keine Differenzierung der Niederschlagsintensität zu. Während der Leishen

LS128S2 das beste Potential hinsichtlich der Kennzeichenerkennung aufzeigte, konnte für diesen Laserscanner keine der vorgestellten Störungserkennungen implementiert werden. Es ist festzuhalten, dass keiner der drei untersuchten LiDAR-Sensoren die besten Ergebnisse für jede Anwendung erzielt.

Als Resultat dieser Diplomarbeit ist hervorzuheben, dass die Verwendung der Kennzeichen als Referenzobjekte für die Erkennung der Scannerverschmutzung beziehungsweise der Witterung nicht sinnvoll ist, weshalb das Grundkonzept (siehe Anlage A) verworfen wurde. Allerdings konnten Alternativen gefunden werden, die ebenso die gestellten Anforderungen erfüllen. Folglich ist mithilfe der finalen Erkenntnisse und Methoden nicht nur eine Verminderung der Systemausfallwahrscheinlichkeit, sondern auch eine Eröffnung neuer Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Industriebereichen möglich.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] MathWorks,
Matlab Documentation, letzte Aktualisierung: 2024
<https://de.mathworks.com/help/matlab/>, Abruf: 12.07.2024
- [2] Pedrotti, Frank L.; Pedrotti, Leno S.; Bausch, Werner; Schmidt, Hartmut:
Optik für Ingenieure – Grundlagen, 3. Aufl.; Springer Berlin Heidelberg 2002, 2005
- [3] Fürstenberg, Kay C.:
Fahrzeugumfelderfassung und Fußgängerschutz unter Nutzung mehrzeiliger Laserscanner; Universität Ulm 2009
- [4] Skutek, Michael:
Ein PreCrash-System auf Basis multisensorieller Umgebungserfassung; Technische Universität Chemnitz 2006
- [5] Beyerer, Jürgen; Puente León, Fernando; Frese, Christian:
Automatische Sichtprüfung - Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, 2. Aufl.; Springer Berlin Heidelberg 2016
- [6] Bao, Jiaqian; Zha, Bingting; Xu, Chenyoushi; Zhang, He:
Study of a laser echo in an inhomogeneous dust environment with a continuous field Monte Carlo radiative transfer model; Optics Express 2021: Heft 12/2021
- [7] o.V.:
datasheet OS1, PDF (online), 2023;
<https://data.ouster.io/downloads/datasheets/datasheet-rev7-v3p0-os1.pdf>, Abruf: 12.06.2024
- [8] o.V.:
OS1 hardware user manual, PDF (online), 2024;
<https://data.ouster.io/downloads/hardware-user-manual/hardware-user-manual-rev7-os1.pdf>, Abruf: 14.06.2024
- [9] o.V.:
LS128S2 user manual, PDF (online), 2023;
<https://gehtmarketplace.com/public/uploads/listings/58c2ff866e6b59518830116ab0eb6e17/79b04073021e6df769f53d4a6046e1e0-0.pdf>, Abruf: 14.06.2024
- [10] o.V.:
Livox Horizon user manual v1.0, PDF (online), 2019;
<https://www.livoxtech.com/3296f540ecf5458a8829e01cf429798e/assets/horizon/Livox%20Horizon%20user%20manual%20v1.0.pdf>, Abruf: 15.06.2024

-
- [11] o.V.:
Livox Horizon Quick Start Guide v1.4, PDF (online), 2019;
<https://www.livoxtech.com/3296f540ecf5458a8829e01cf429798e/assets/horizon/Livox%20Horizon%20Quick%20Start%20Guide.pdf>, Abruf; 21.06.2024
- [12] Aijazi, Ahmad K.; Checchin, Paul:
Non-Repetitive Scanning LiDAR Sensor for Robust 3D Point Cloud Registration in Localization and Mapping Applications; sensors 2024: Heft 2/2024
- [13] Norm DIN 74069 Oktober 2022: *Retroreflektierende Kennzeichenschilder, Stempelplaketten und Plakettenträger für Kraftfahrzeuge und deren Anhängfahrzeuge*
- [14] Norm DIN 67520 Oktober 2013: *Retroreflektierende Materialien zur Verkehrssicherung – Lichttechnische Mindestanforderungen an Reflexstoffe*
- [15] o.V.:
Herstellung von retroreflektierenden Verkehrsschildern, PDF (online), 2015
https://www.marabu-druckfarben.de/fileadmin/marabu-druckfarben/PDFs/TechInfos/Traffic_Signs_TS_TI_D_0615.pdf, Abruf: 27.06.2024
- [16] Riveiro, Belen; Diaz-Vilarino, Lucia; Conde-Carnero, Borja; Soilan, Mario; Arias, Pedro:
Automatic Segmentation and Shape-Based Classification of Retro-Reflective Traffic Signs from Mobile LiDAR Data, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING 2016, Heft 1/2016, S. 295-303
- [17] Blechschmidt, F.:
Entwicklung einer Verkehrszeichenerkennung mittels Lidar-Sensorik, HTW Dresden / Mechlab 2022
- [18] Norm DIN ISO 8855 November 2013: *Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten*
- [19] Pingel, Thomas J.; Clarke, Keith C.; McBride, William A.:
An improved simple morphological filter for the terrain classification of airborne LIDAR data; ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2013, Heft 1/2013, S. 21-30
- [20] ADAC:
Sitzhöhe: Welches Motorrad für welche Beinlänge?; Veröffentlichung von 20.03.2024
<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/zweirad/motorrad-roller/kauf-verkauf/sitzhoehen-aktueller-modelle/>, Abruf: 09.07.2024

-
- [21] Gordon, Claire C.; Churchill, Thomas; Clauser, Charles E.; Bradtmiller Bruce; McConville, John T.; Tebbetts, Ilse; Walker, Robert A.:
Anthropometric survey of U.S. Army Personnel – Summary statistics interim report; United States Army Research, Development and Engineering Center, Natick 1989
- [22] Trautmann, Toralf:
Weihnachtsmessungen erfolgreich abgeschlossen; Veröffentlichung von
28.09.2023
<https://mechlab.de/weihnachtsmessungen-erfolgreich-abgeschlossen-christmas-measurements-successfully-completed/>, Abruf: 13.05.2024
- [23] Parthier, Rainer:
Messtechnik - Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure; 3. Aufl., Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006
- [24] Mareczek, Jörg:
Grundlagen der Roboter-Manipulation – Modellbildung von Kinematik und Dynamik; 1. Bd., 1. Aufl., Springer Vieweg, Berlin 2019

Eidesstattliche Erklärung

Das vorliegende Dokument wurde an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Toralf Trautmann angefertigt.

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit zum Thema

„Entwicklung einer Kennzeichenerkennung mithilfe eines LiDARs mit dem Ziel, den Verschmutzungsgrad des Sensors sowie die Witterung abzuschätzen“

selbstständig und ohne Benutzung anderer Quellen und Hilfsmittel als angegeben angefertigt habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ferner gestatte ich der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, die vorliegende Diplomarbeit unter Beachtung insbesondere urheber-, datenschutz- und wettbewerbsrechtlichen Vorschriften für Lehre und Forschung zu nutzen.

Dresden, 30.08.2024

Ort, Datum

Schulz

.....
Unterschrift

Anlagenverzeichnis

A	Verworfenes Grundkonzept	91
B	Koordinatentransformation	94
C	Entfernungsabhängige Punktdichte	95
D	Programmablaufpläne	100
E	Messanalyse der Bestrahlungsstärke	106
	E.1 Objektentfernung	106
	E.2 Kennzeichenreflektivität	107
	E.3 Einfallswinkel	108
	E.4 Verschmutzung der Sensorscheibe	110

Anlagen

A) Verworfenes Grundkonzept

Um den Ausfall oder den Leistungsverlust eines LiDAR-Scanners zu erkennen, werden die Messwerte hinsichtlich der äußeren Beeinflussungen analysiert. Bei der Verwendung mehrerer (redundanter) Umfoldsensoren, ist es beispielsweise möglich, dass bei der Messwertfusion der gestörte Sensor in der Datenverarbeitung geringer gewichtet wird. Die Verschlechterung der Messqualität kann sich verschieden äußern. Es ist denkbar, dass die Messunsicherheit zunimmt oder sich der Sichtbereich verkleinert. Bei der Fehlererkennung ist zwischen der dauerhaften beziehungsweise kurzweiligen Beeinflussung des Systems zu unterscheiden. Hinsichtlich der Witterungs- und Verschmutzungsdetektion sind Abweichungen von Bedeutung, die über einen längeren Zeitraum existieren. Das folgende Konzept wird sowohl für die Verschmutzungs- als auch die Witterungsabschätzung getestet. In den Erläuterungen wird jedoch stellvertretend von der Verschmutzungserkennung berichtet. Die gleichen Zusammenhänge gelten darüber hinaus für die Witterungserkennung.

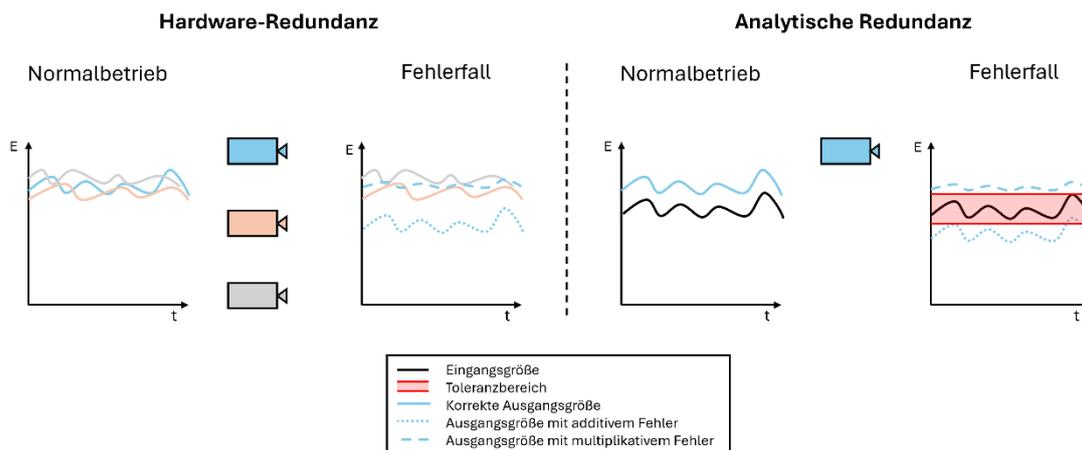


Abbildung A.1: Störungserkennung mithilfe der Hardware- beziehungsweise der Analytischen Redundanz

Abbildung A.1 veranschaulicht zwei etablierte Methoden der Störungserkennung. Für Laserscanner, die zusammen mit weiteren Umfoldsensoren zum Einsatz kommen, kann beispielsweise das Verfahren der **Hardware-Redundanz** verwendet werden. Hierbei erfolgt die Verarbeitung auf der Grundlage der Messergebnisse mehrerer Sensoren (LiDAR, Kamera, Ultraschall- oder Radarsensor). Weicht die Sensorausgabe eines Laserscanners von den anderen ab, kann auf eine Störung im entsprechenden Sensor geschlossen werden (siehe Abbildung A.1, Hardware-Redundanz – Fehlerfall, blaue Kurven). Dieser Fehler kann als Offset- oder additiver Fehler bezeichnet werden. Er bewirkt eine Verschiebung des Graphen der Messgröße. Hinsichtlich der Verschmutzungsanalyse ist dahingegen eine Beeinflussung durch multiplikative Fehler, auch Verstärkungsfehler genannt, zu erwarten. Für die Verschmutzungserkennung kann diese Fehlererkennungslogik nicht angewendet

werden, da die Laserscanner im Parallelbetrieb in der Regel ähnliche Verschmutzungen aufweisen. Mit der Hardware-Redundanz werden jedoch nur Auffälligkeiten erkannt, wenn die Mehrheit der Sensoren fehlerfrei arbeitet.

Die **analytische Redundanz** stellt eine Alternative zur Hardware-Redundanz dar. Hierbei werden nicht mehrere Sensoren als Referenz benötigt. Allerdings müssen die Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgröße bekannt sein, sodass Ausfälle oder drastische Abweichungen vom Erwartungsbereich erkannt werden können. Mit dieser Fehlererkennungsmethode lassen sich ebenfalls additive, multiplikative sowie kombinierte Fehler detektieren. Um diese Fehlererkennungsmethode auf die Abschätzung der Sensorverschmutzung anwenden zu können, muss der Verlauf der Eingangsgröße bekannt sein. [23]

Im Rahmen dieses Konzepts wird als Eingangsgröße der Mittelwert der Bestrahlungsstärke der Kennzeichenreflexionen verwendet. Um einen Erwartungsbereich für beliebige Umgebungsbedingungen vorhersagen zu können, sollen Messungen bei verschiedenen Szenarien durchgeführt werden. Bei der Nutzung der analytischen Fehlererkennung gibt es verschiedene Logiken, mit der Sensorausfälle oder Sensorbeeinflussungen erkannt werden können.

Die Erkennung eines Sensorausfalls beziehungsweise eines Leistungsverlustes kann entweder nach modellbasierten oder **modellfreien Verfahren** erfolgen. Letztere erkennen beispielsweise Auffälligkeiten in Funktionsverläufen oder Änderungen im Sensorrauschen. Es werden sprunghafte Veränderungen gesucht. Bei der Witterung und der Scheibenablagerung handelt es sich dahingegen um langanhaltende Zustände. Diese können mit einem **modellbasierten Verfahren** detektiert werden. [4],

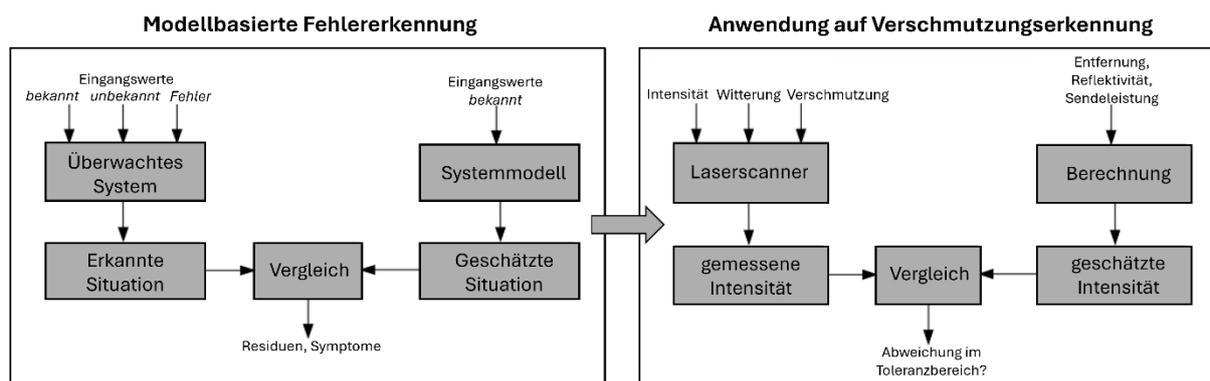


Abbildung A.2: modellbasierte Erkennung von Sensorleistungsverlusten (nach [4])

Abbildung A.2 stellt schematisch dar, wie die Verschmutzungs- beziehungsweise Witterungserkennung mit einem modellbasierten Vergleich erfolgen kann.

Das reflektierte Licht des Laserpulses weist eine gewisse Energie auf, die im Sensor als Bestrahlungsstärke gemessen wird. Die bekannte Eingangsgröße ist die Bestrahlungsstärke des Kennzeichens bei bekanntem Abstand. Unbekannt sind die äußeren Einflüsse

wie Witterung und Verschmutzung (siehe Abbildung A.2, Eingangswerte). Mindestens einer dieser beiden Faktoren kann zu einem fehlerhaften Anteil des Eingangswertes führen. Ziel ist es, zu quantifizieren, wie groß der Fehleranteil im Messsignal ist. Hierfür soll die modellbasierte analytische Fehlererkennung wie folgt ablaufen:

Das überwachte System nimmt die Bestrahlungsstärke als Messgröße (siehe Abbildung A.2, erkannte Situation) auf. Dieses Messergebnis steht im anschließenden Vergleich dem Resultat der Berechnung (geschätzte Situation) gegenüber. Das Systemmodell berücksichtigt die Entfernung r , die Lasersendeleistung Φ und die durchschnittliche Kennzeichenreflektivität R (siehe Gleichung 2.4) und schätzt damit ab, wie groß der zu erwartende Intensitätswert an den Photosensoren ist. Die Abweichung zwischen gemessenem und geschätztem Intensitätswert wird als Residuum bezeichnet und resultiert sowohl aus der Messunsicherheit des LiDARs als auch aus Störungen. Das Ziel wird es sein, anhand dieser Residuen zu erkennen, ob der Laserscanner verschmutzt ist. Die Verschmutzungserkennung wird demnach nicht erfolgreich sein, wenn ähnliche Residuen auch bei anderen Umwelteinflüssen, wie zum Beispiel der Kennzeichenverwitterung, eintreten. In diesem Fall könnte der Algorithmus basierend auf dem vorgestellten Modell nicht unterscheiden, ob das beobachtete Kennzeichen oder der Lidar verschmutzt ist, wenn beide Störungen jeweils ähnliche Intensitätsabweichungen erzeugen. Da das Modell Vereinfachungen gegenüber der Realität aufweist und bereits im störungsfreien Zustand Abweichungen existieren, sind im Idealzustand (saubere Optik und sauberes Kennzeichen, Abwesenheit von Nässe/Niederschlag etc.) geringe Residuen zu erwarten. Daher müssen Grenzen festgelegt werden, in denen die Abweichung zwischen geschätztem und gemessenem Intensitätswert im störungsfreien Betrieb liegt. In der Abbildung A.1 ist dieser Toleranzbereich rot gekennzeichnet.

B) Koordinatentransformation

Die Koordinatensysteme, auf denen sich die Messdaten der LiDAR-Sensoren beziehen, variieren in der Ausrichtung. Um die Daten miteinander vergleichen zu können und einen universellen Algorithmus anzuwenden, müssen die unterschiedlichen Koordinatensysteme in ein Gemeinsames überführt werden. Da der Koordinatenursprung bei jedem Exemplar im Bereich des Laserscanners liegt, ist es ausreichend die Punktkoordinaten durch eine Rotation zu transformieren. Diese wird durch einen Verdrehwinkel eindeutig definiert, da die z-Achse bereits in jedem Koordinatensystem nach oben gerichtet ist. Die Vorgehensweise dieser rigiden Transformation ist nachfolgend aufgeführt:

Ein Punkt im dreidimensionalen Raum ist durch seinen Ortsvektor

$$\vec{v}^k = \begin{pmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ v_{zk} \end{pmatrix}$$

definiert. Die Koordinatenachsen sind voneinander unabhängige Einheitsvektoren, sodass die drei Achsen durch die Richtungsvektoren

$$\vec{e}_{xk}^k = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{e}_{yk}^k = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \vec{e}_{zk}^k = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

beschrieben werden können:

Der Punkt \vec{v}_k kann mathematisch als Summenschreibweise

$$\vec{v}_k = v_{xk} * \vec{e}_{xk} + v_{yk} * \vec{e}_{yk} + v_{zk} * \vec{e}_{zk} \quad (\text{B.1})$$

oder als Matrixschreibweise

$$v_k = \begin{pmatrix} v_{xk} \\ v_{yk} \\ v_{zk} \end{pmatrix} * B_k \quad (\text{B.2})$$

angegeben werden. Hierbei wird B_k als Basis des Koordinatensystems bezeichnet:

$$B_k = [e_{xk} \ e_{yk} \ e_{zk}] = \left[\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Da die positive z-Achse der Sensoren stets nach oben gerichtet ist, kann die Rotation in ein ebenes Problem überführt werden.

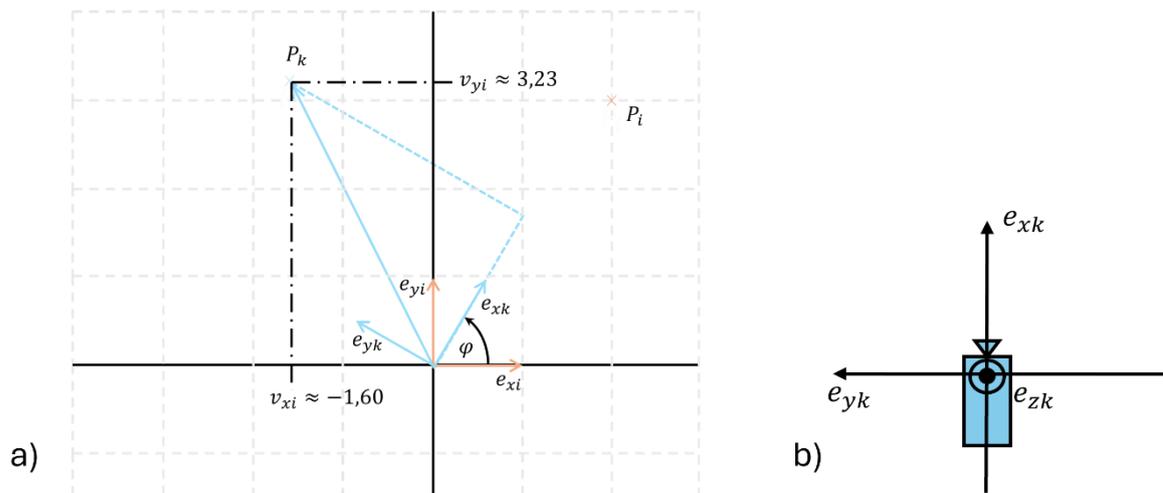


Abbildung B.1: kartesisches LiDAR-Koordinatensystem: a) allgemeine Koordinatentransformation eines Punktes in der Ebene b) Ausrichtung nach Transformation (nach[18], [24])

In Abbildung B.1 (a) ist beispielhaft die Rotation eines Punktes P_k um $\varphi = 60^\circ$ dargestellt. Für die neue Basis des blau gekennzeichneten verdrehten Koordinatensystems B_k^i gilt demnach

$$B_k^i = \begin{bmatrix} \cos 60^\circ & -\sin 60^\circ \\ \sin 60^\circ & \cos 60^\circ \end{bmatrix}$$

Für einen Punkt $P^i = (2; 3)$ können schließlich die transformierten Koordinaten berechnet werden:

$$v^i = \begin{bmatrix} \cos 60^\circ & -\sin 60^\circ \\ \sin 60^\circ & \cos 60^\circ \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} -1,60 \\ 3,23 \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

[24]

C) Entfernungabhängige Punktdichte

Für die Entwicklung eines eigenen Clusteralgorithmus, der die Kenntnis über die entfernungsabhängige Punktdichte der Mehrzeilenscanner nutzt, werden im Folgenden die Grenzwerte der Punktabstände hergeleitet. Aufgrund des CropBox-Filters fokussiert sich die Clusterung auf den Bereich vor dem Laserscanner. Daher ist der Einfluss der Strichdrehung, welche primär im seitlichen Umfeld zur Verringerung der Punktzeilenabstände führt, vernachlässigbar. Für die Mehrzeilenscanner Leishen LS128S2 und Ouster OS1 wird der zulässige Grenzwert der y-Differenzen aus folgender geometrischen Beziehung abgeleitet:

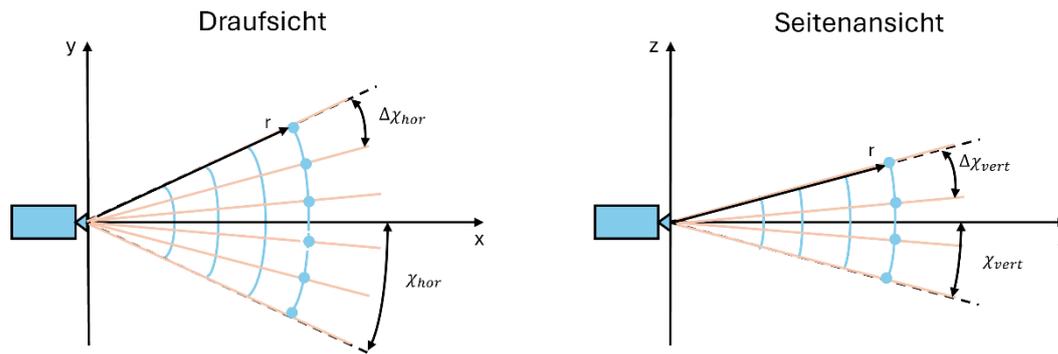


Abbildung C.1: Abhängigkeit der Punktabstände von der Objektentfernung

Die Abbildung C.1 verdeutlicht, dass die Punktabstände mit der Objektentfernung ansteigen. Dies ist auf die konstanten Teilöffnungswinkel $\Delta\chi_{hor}$ und $\Delta\chi_{vert}$ zurückzuführen. Die blauen Linien symbolisieren die sphärischen Flächen, auf denen die Punkte äquidistant verteilt sind. Das bedeutet, dass die Punkte einer horizontalen Zeile auf jeder der Kugelschalen gleiche Abstände aufweisen (siehe Draufsicht). Dieser Sachverhalt gilt ebenso für die vertikalen Punktabstände (siehe Seitenansicht). Der abgebildete Strahlenverlauf wird durch das Rotieren der Ablenkoptik erzeugt. Der Rotationsmittelpunkt der Optik ist das Zentrum der Kugeln, zu denen die blauen Schalen gehören. Eine sphärische Fläche wird eindeutig durch den Radius r beschrieben, welcher den Abstand zwischen Laser und Kugelschale darstellt.

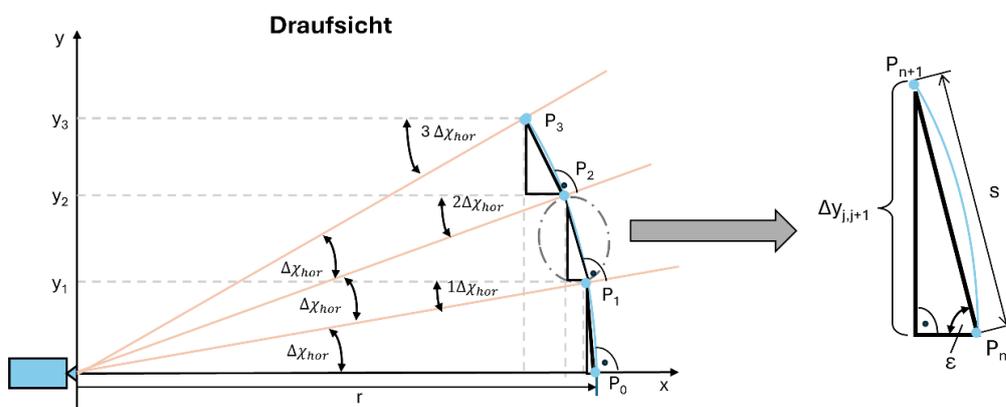


Abbildung C.2: geometrische Herleitung der y-Differenz

In der Abbildung C.2 ist die Draufsicht einer beispielhaften Strahlenausbreitung dargestellt. Mithilfe des Index j werden die Messpunkte von der optischen Achse nach außen aufsteigend nummeriert. Hierbei wird die Symmetrie der Laserstrahlen genutzt, weshalb in der Formelherleitung nur die Seite der positiven y -Werte analysiert wird. Die Differenz der y -Koordinaten zweier benachbarter Punkte wird allgemein als $\Delta y_{j,j+1}$ bezeichnet.

Der Kreisbogen wird in äquivalente Bogenlängen geteilt. An jedem Teilbogen wird ein rechtwinkliges Dreieck angelegt, dessen Hypotenuse der jeweiligen Sehne s entspricht. Die Sehne verbindet zwei aufeinanderfolgende Punkte des Kreisbogens miteinander. Ihre Länge kann mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$s = 2r * \sin\left(\frac{\Delta\chi_{hor}}{2}\right) \quad (C.1)$$

Aufgrund des konstanten Radius r und des gleichbleibenden horizontalen Teilöffnungswinkels $\Delta\chi_{hor}$ ist die Hypotenuse aller Dreiecke gleich lang. Da für die Sortierung der y -Koordinaten jedoch nicht der Eulersche Abstand benachbarter Punkte, sondern die Differenz der y -Koordinaten von Interesse ist, wird durch die geometrische Beziehung am dargestellten Dreieck die Länge der parallel zur y -Achse liegenden Kathete berechnet:

$$\Delta y_{j,j+1} = \sin(\varepsilon) * s \quad (C.2)$$

Der Winkel ε wird umso kleiner, je weiter der Messpunkt von der optischen Achse des LiDARs entfernt ist. Für diesen Winkel gilt:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} - j * \Delta\chi_{hor} \quad (C.3)$$

Wird nun Gleichung C.1 und C.3 in die Formel C.2 eingesetzt, entsteht folgende Beziehung:

$$\Delta y_{j,j+1} = 2r * \sin\left(\frac{\Delta\chi_{hor}}{2}\right) * \sin\left(\frac{\pi}{2} - j * \Delta\chi_{hor}\right) \quad (C.4)$$

Da dem Segmentierungsalgorithmus keine direkten Informationen über den zugehörigen Strahlindex des Punktes vorliegen, wird schließlich eine Substitution des Index n durch die Koordinate y durchgeführt. Für die y -Werte aller Punkte auf einer Kugelfläche gilt:

$$y_j = r * \sin(j * \Delta\chi_{hor}) \quad (C.5)$$

Durch Umformen

$$j = \frac{\sin^{-1}\left(\frac{y_j}{r}\right)}{\Delta\chi_{hor}} \quad (C.6)$$

kann schließlich der Index j in der Gleichung C.4 eliminiert werden:

$$\Delta y_{j,j+1} = 2r * \sin\left(\frac{\Delta\chi_{hor}}{2}\right) * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{|y|}{r}\right)\right) \quad (C.7)$$

Der zweite Sinus-Term kann nun vereinfacht werden, durch:

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{|y|}{r}\right)\right) = \cos\left(\sin^{-1}\left(\frac{|y|}{r}\right)\right) = \sqrt{1 - \left(\frac{|y|}{r}\right)^2} = \frac{\sqrt{r^2 - y^2}}{r} \quad (C.8)$$

Für die Differenz aufeinanderfolgender Punkte in y-Richtung gilt folglich:

$$\Delta y_{j,j+1} = 2r * \sin\left(\frac{\Delta\chi_{hor}}{2}\right) * \frac{\sqrt{r^2 - y^2}}{r} \quad (C.9)$$

Durch eine weitere Vereinfachung lautet die finale Gleichung:

$$\Delta y_{j,j+1} = 2 * \sin\left(\frac{\Delta\chi_{hor}}{2}\right) * \sqrt{r^2 - y^2} \quad (C.10)$$

Das bedeutet, dass auf der sphärischen Fläche die Differenz der y-Werte ortsabhängig ist. Aus Formel C.10 geht hervor, dass $\Delta y_{j,j+1}$ unabhängig vom Vorzeichen der y-Werte ist (achsensymmetrisch). Diese Symmetrie kann dem nachfolgenden Diagramm entnommen werden.

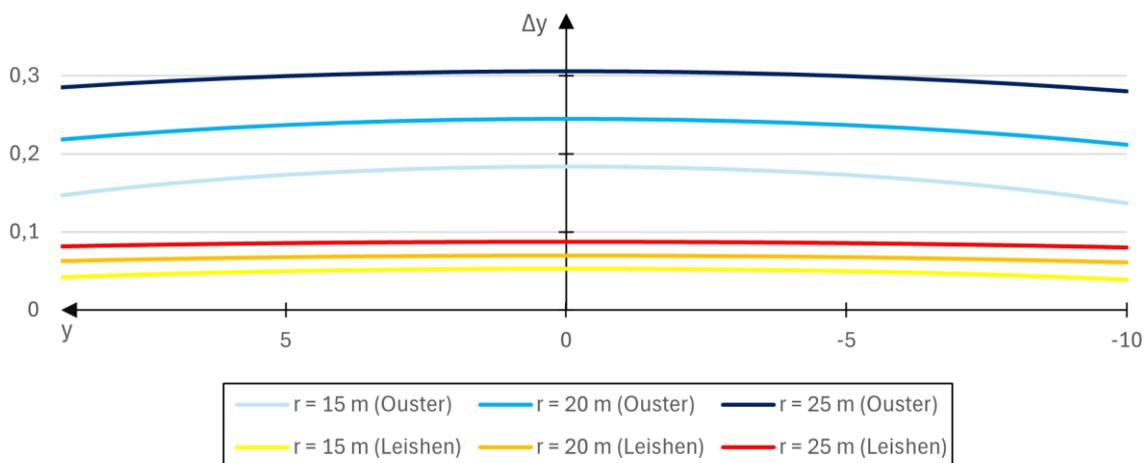


Abbildung C.3: $\Delta y = f(y, r, \Delta\chi_{hor})$ - Diagramm, Ouster: $\Delta\chi_{hor} = 0,7^\circ$; Leishen: $\Delta\chi_{hor} = 0,2^\circ$

Aus der Abbildung C.3 geht hervor, dass die Differenzen der y-Koordinaten für kleine Teilöffnungswinkel ($\Delta\chi_{hor} \leq 0,2^\circ$) nahezu konstant sind. Dies wird anhand der Graphen des Leishen-Scanners deutlich. Die Abhängigkeit von der y-Koordinate ist beim Ouster-LiDAR stärker ausgeprägt, aber dennoch sehr gering. Zudem verursachen gleiche Variationen der euklidischen Punktentfernung r eine stärkere Verschiebung der blauen Graphen (Ouster OS1). Eine Vereinfachung der Gleichung C.10 ist trotz der geringen Abhängigkeit von der y-Koordinate nicht vorgesehen. Denn der Schwellwert für die y-Differenz sollte sehr genau berechnet werden, um beispielsweise Fahrzeugrückstrahler, die sich unmittelbar neben

dem Nummernschild am Heck befinden (z.B. BMW i3), als separates Segment zu identifizieren.

In der Abbildung C.1 ist zu erkennen, dass sich die Punktverteilung innerhalb einer Kugelschale in horizontaler Richtung gegenüber der in vertikaler Richtung nur unterscheidet, wenn der horizontale und vertikale Teilöffnungswinkel nicht gleichwertig sind. Analog zur Gleichung C.10 gilt für die zu erwartende Differenz zweier aufeinanderfolgender z-Koordinaten eines Segments:

$$\Delta z_{j,j+1} = 2 * \sin\left(\frac{\Delta \chi_{hor}}{2}\right) * \sqrt{r^2 - z^2} \quad (C.11)$$

Auf die Herleitung der Differenzen in x-Richtung wird verzichtet, da aus genannten Gründen ein grober Schwellwert genügt.

D) Programmablaufpläne

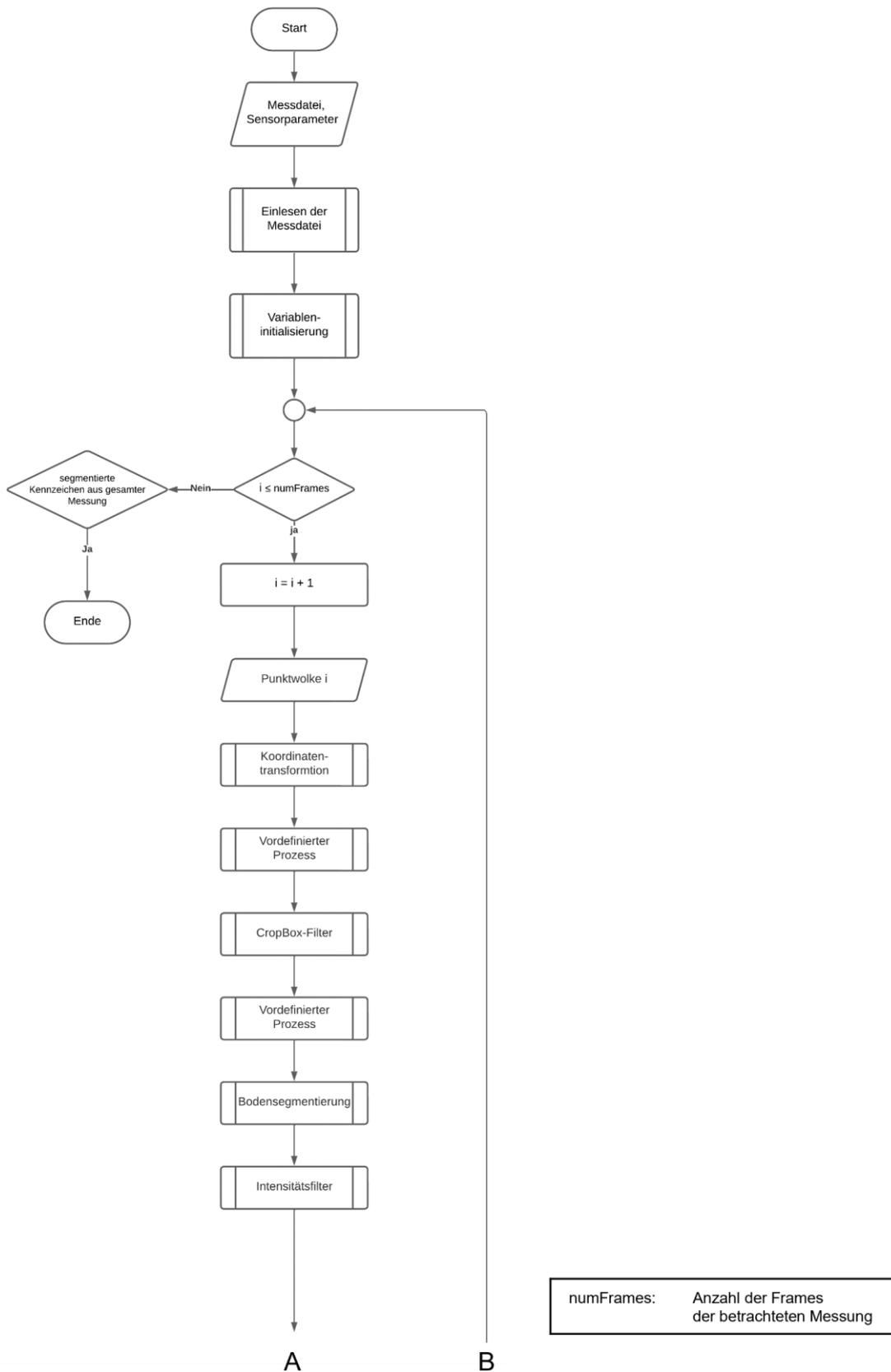
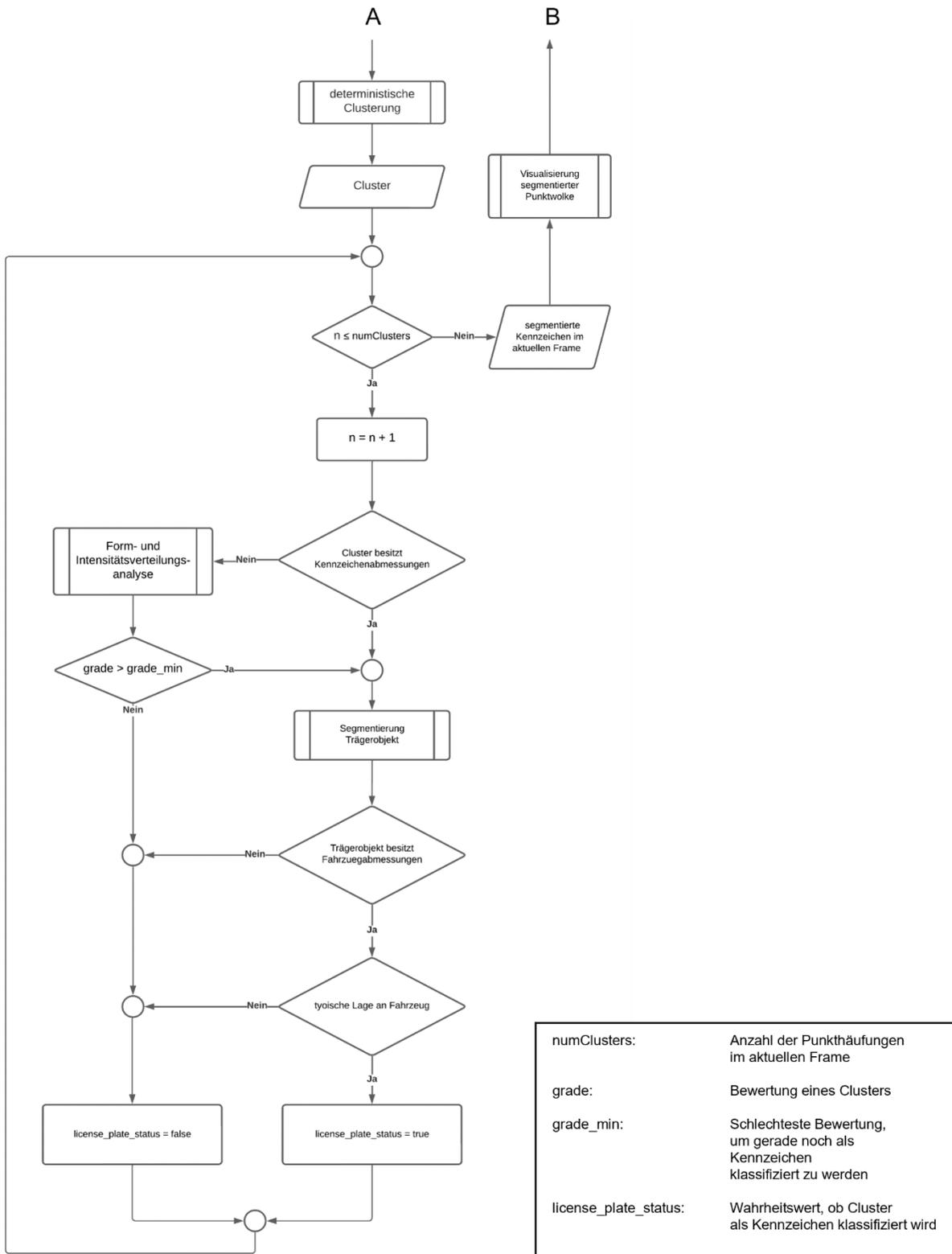


Abbildung D.1: Kennzeichenerkennung, Teil 1



numClusters:	Anzahl der Punkthäufungen im aktuellen Frame
grade:	Bewertung eines Clusters
grade_min:	Schlechteste Bewertung, um gerade noch als Kennzeichen klassifiziert zu werden
license_plate_status:	Wahrheitswert, ob Cluster als Kennzeichen klassifiziert wird

Abbildung D.2: Kennzeichenerkennung, Teil 2

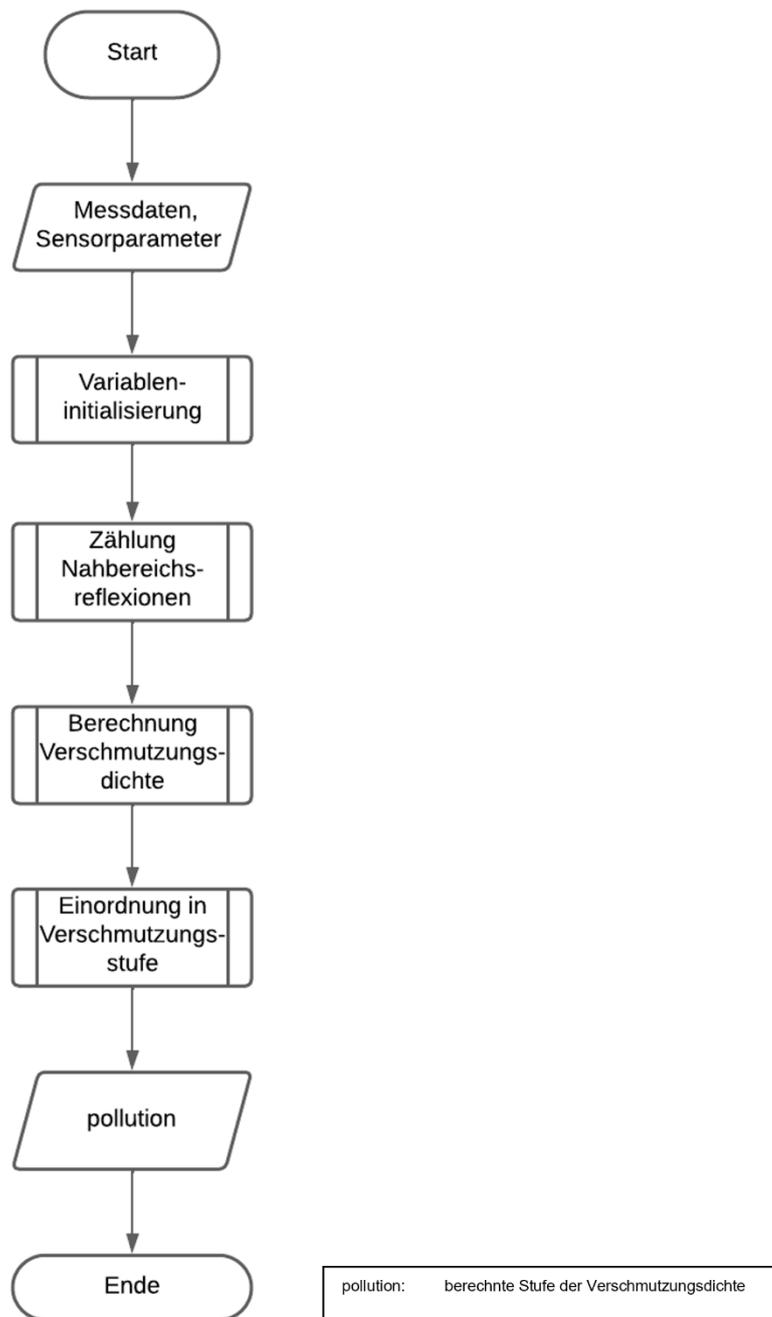


Abbildung D.3: Verschmutzungserkennung

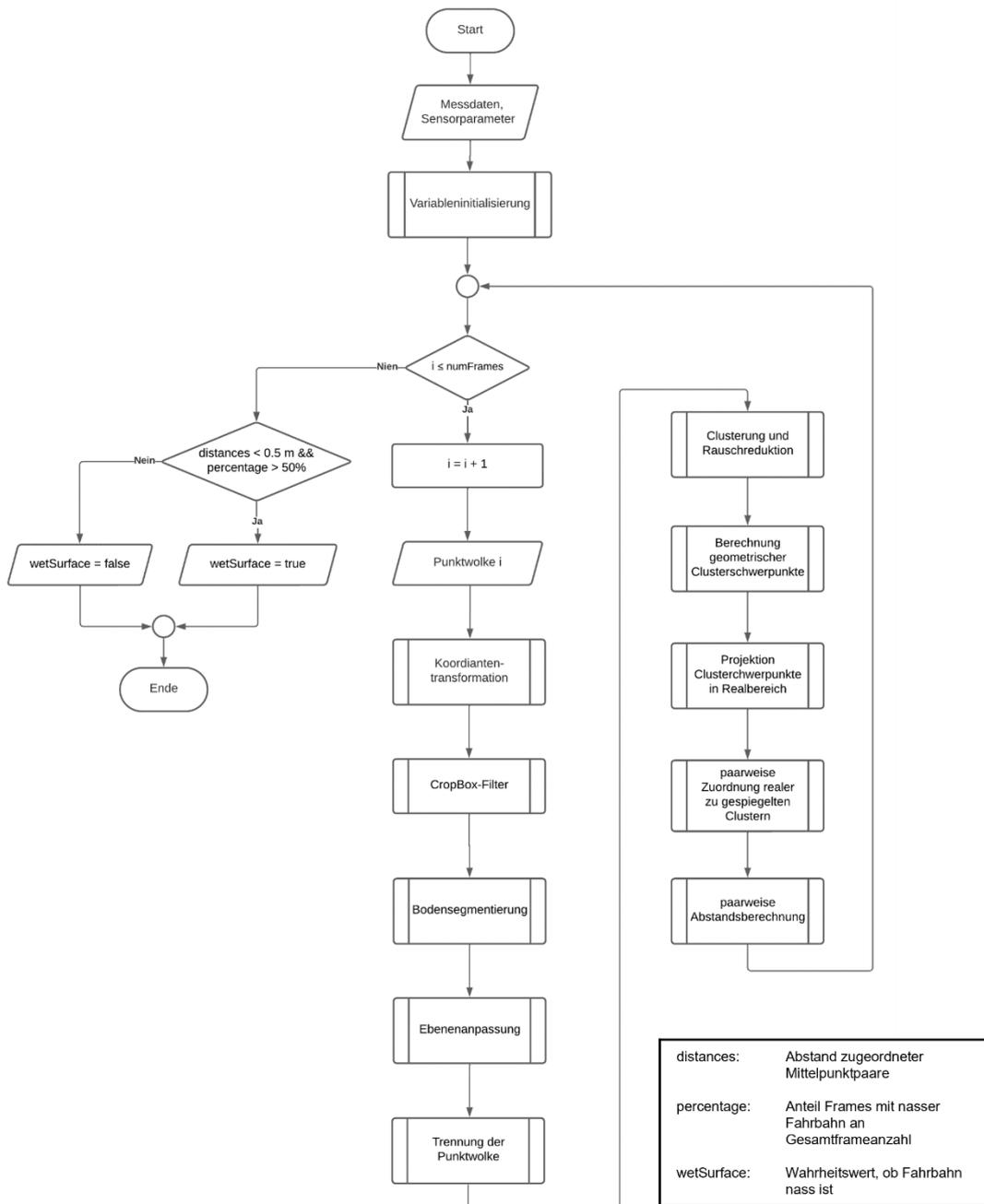


Abbildung D.4: Erkennung der Fahrbahnfeuchtigkeit

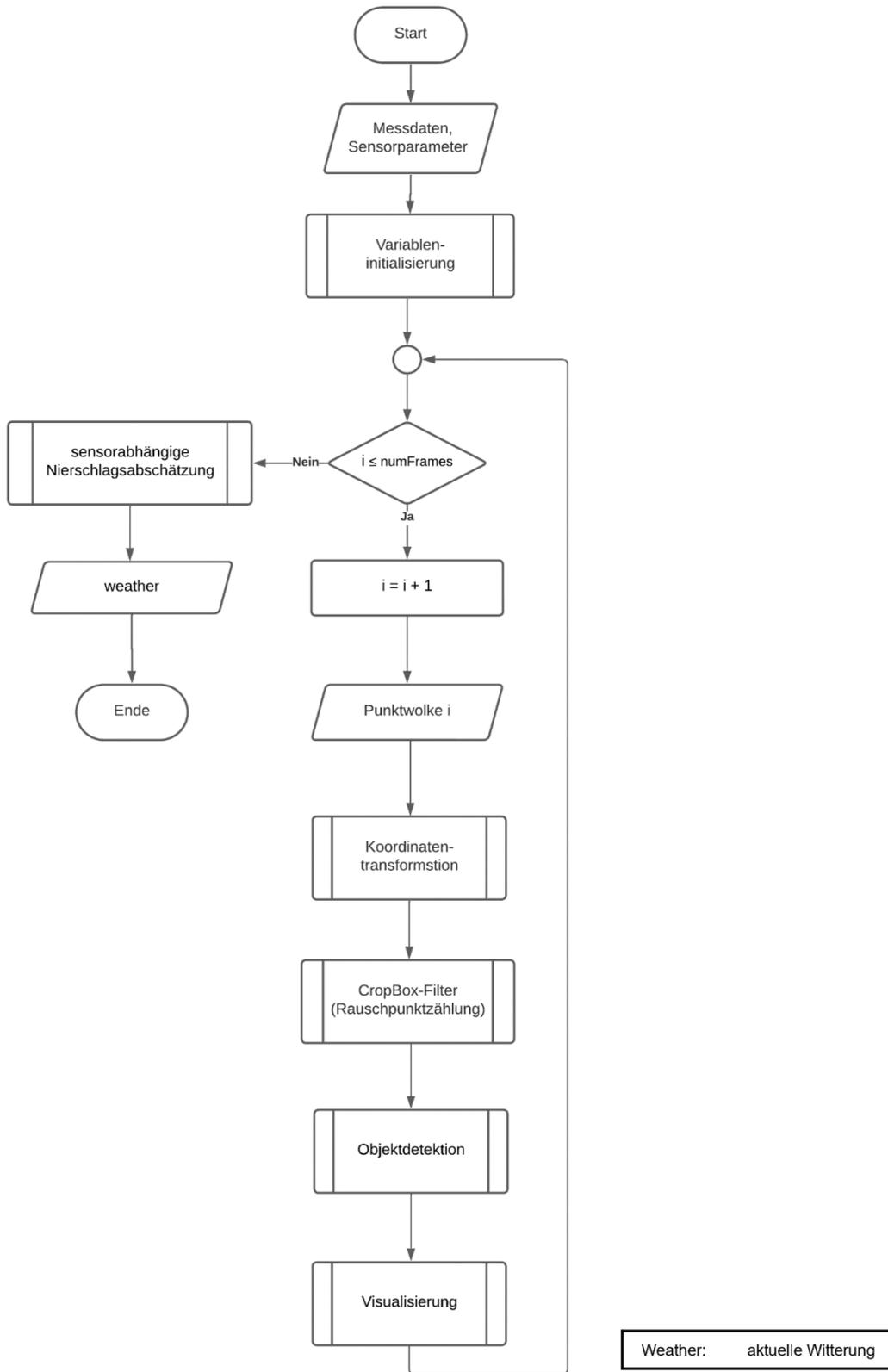


Abbildung D.5: Erkennung des Niederschlags

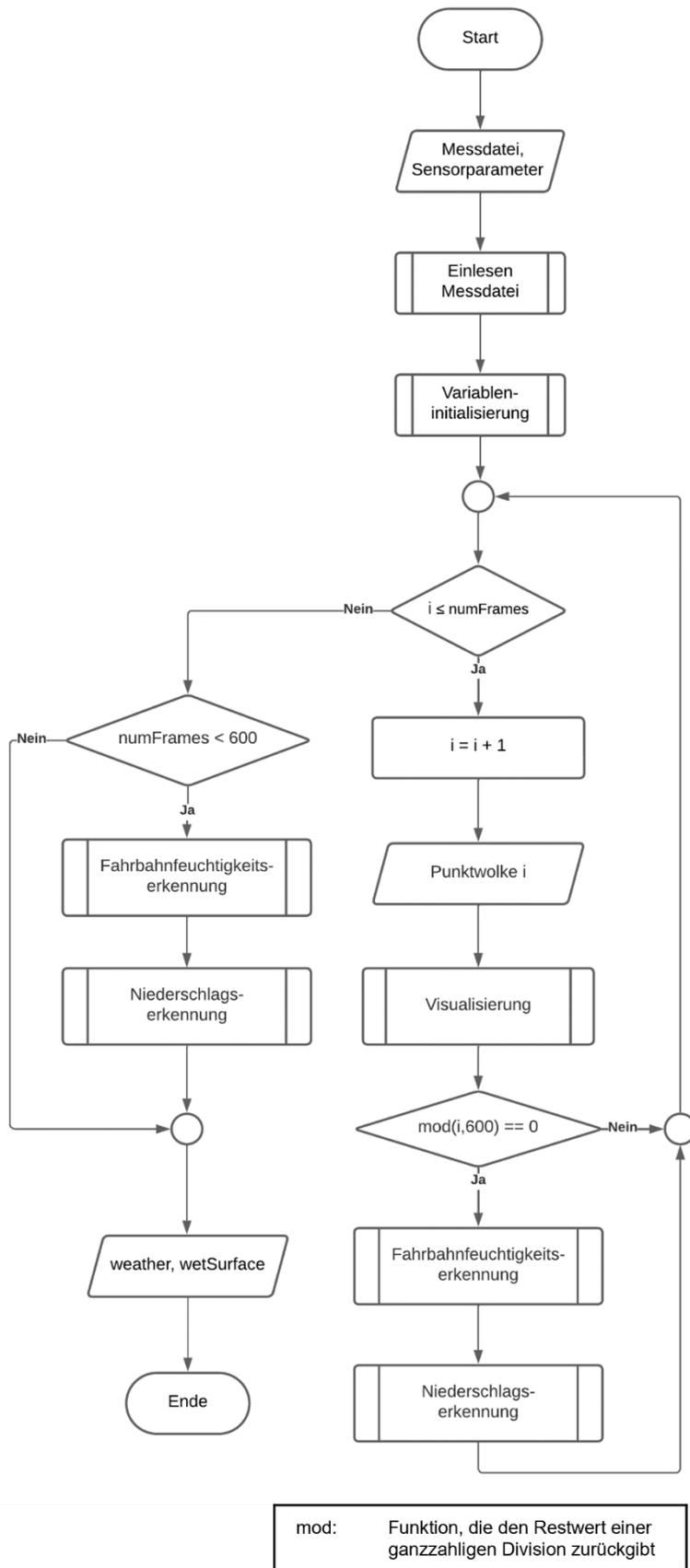


Abbildung D.6: Hauptskript der Witterungserkennung

E) Messanalyse der Bestrahlungsstärke

E.1) Objektentfernung



Abbildung E.1: Variation der Objektentfernung

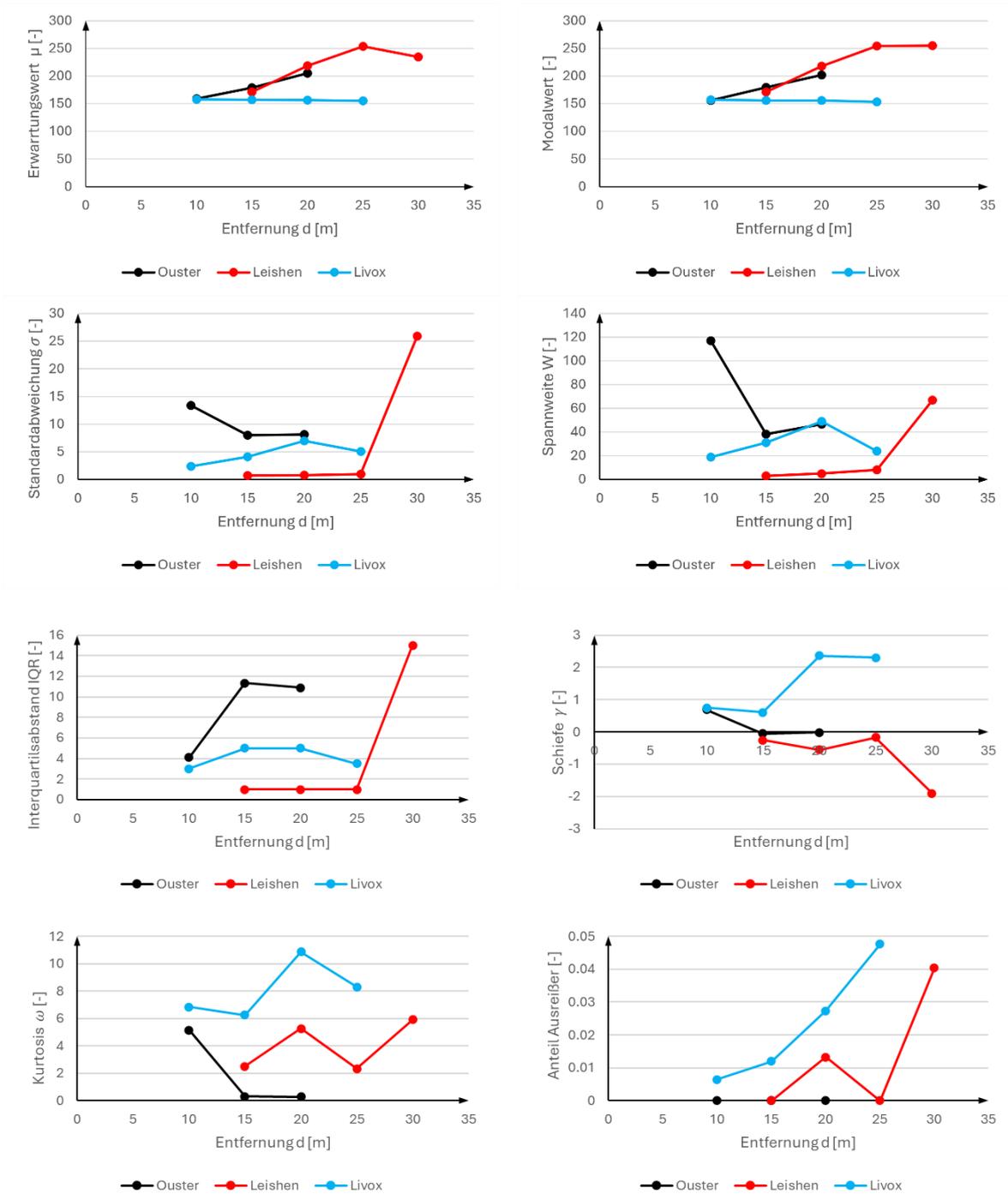


Abbildung E.2: statistische Kenngrößen in Abhängigkeit der Objektentfernung

E.2) Kennzeichenreflektivität



starke Verschmutzung



geschädigte Reflexfolie infolge UV-Strahlung



moderate Verschmutzung



Neuzustand

Abbildung E.3: Variation der Verwitterungszustände des Kennzeichens

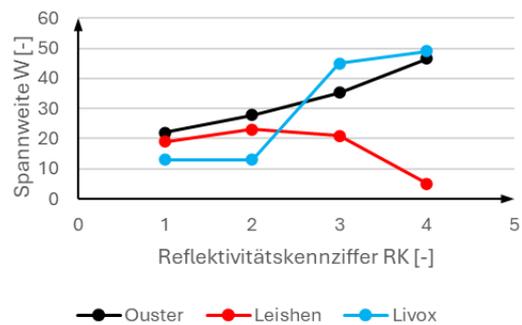
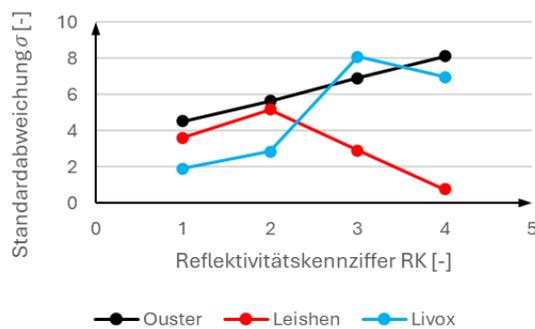
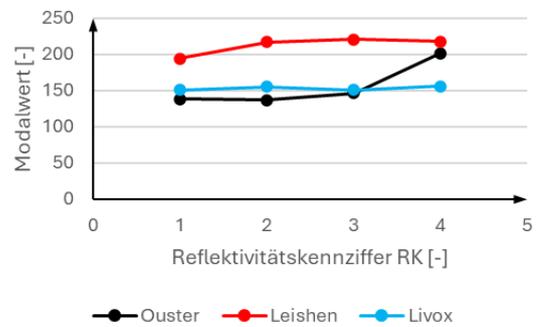
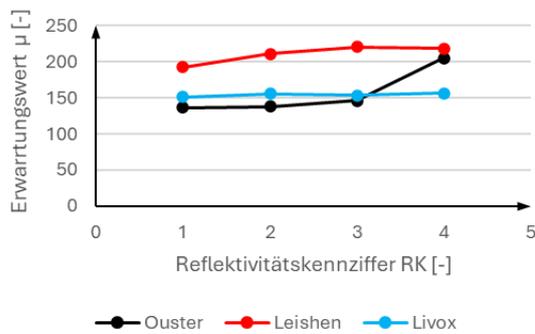


Abbildung E.4: statistische Kenngrößen in Abhängigkeit der Kennzeichenreflektivität

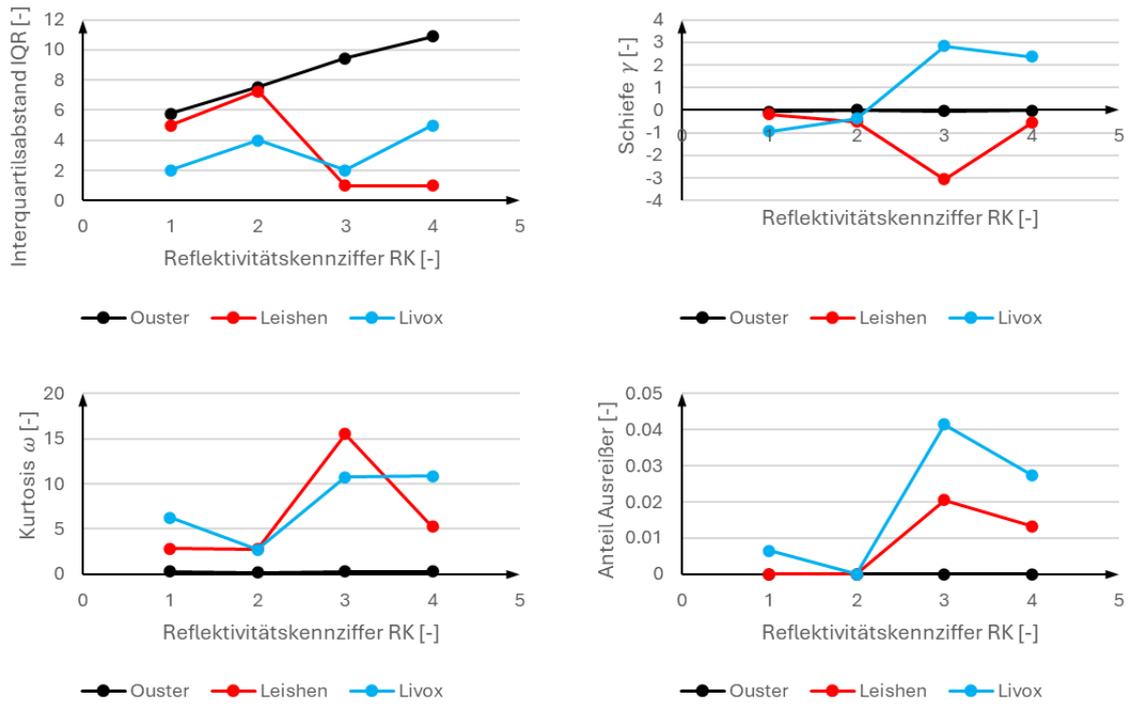


Abbildung E.5: weitere statistische Kenngrößen in Abhängigkeit der Kennzeichenreflektivität

E.3) Einfallswinkel

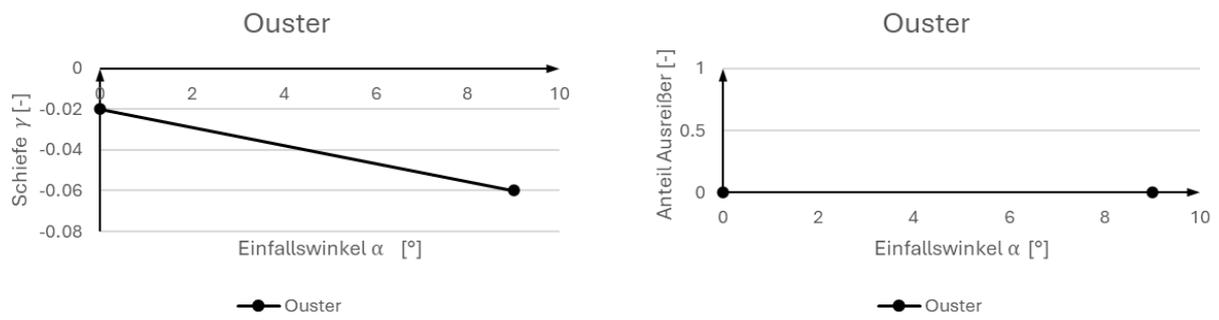


Abbildung E.6: statistische Kenngrößen in Abhängigkeit des Einfallswinkels

E.4) Verschmutzung der Sensorscheibe



Abbildung E.7: Variation der Verschmutzungsfolien

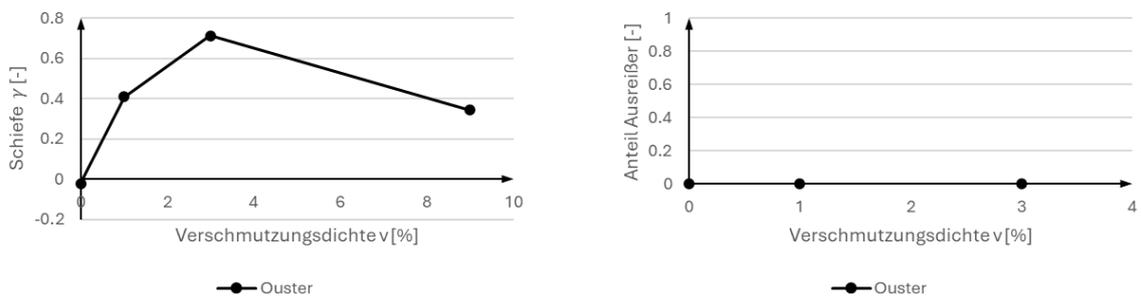


Abbildung E.8: statistische Kenngrößen in Abhängigkeit von der Verschmutzungsdichte

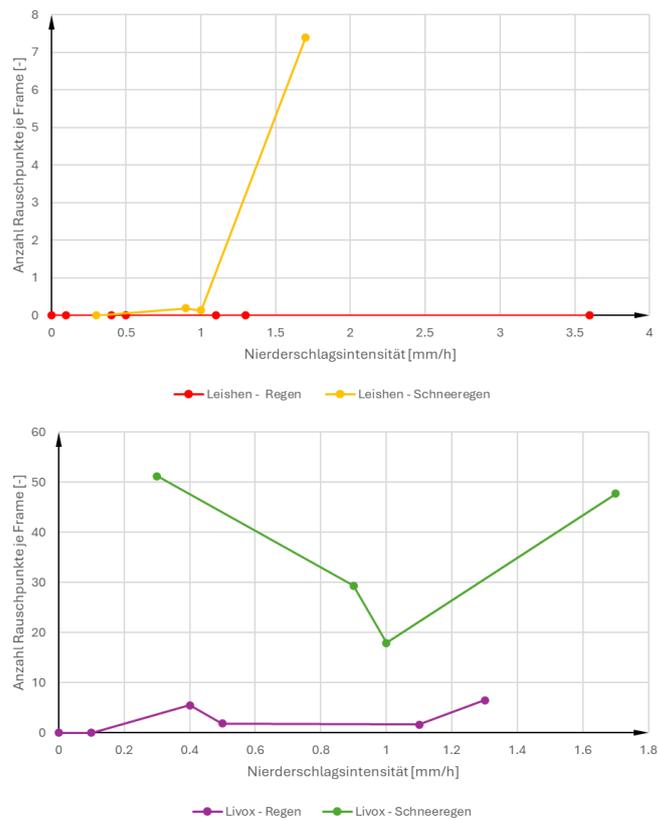


Abbildung E.9: Abhängigkeit der Rauschpunktanzahl von der Niederschlagsintensität

F) Datenträger

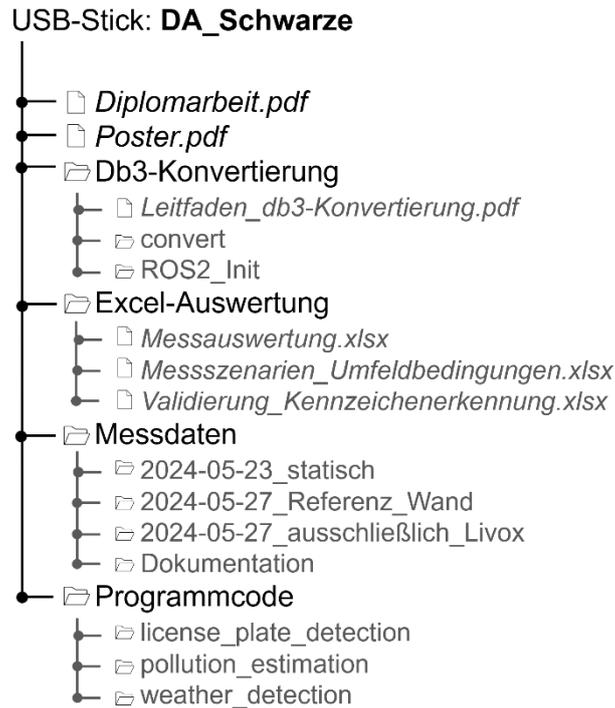


Abbildung F.1: Verzeichnisstruktur des Datenträgers

Tabelle F.1: Kurzbeschreibung der Matlab-Skripte und -Funktionen

Hilfsprogramme	
blackAndWhitePercentage	Berechnung des Schwarz- beziehungsweise Weißanteils im Schwarz-Weiß-Bild
cell2PointCloud.m	Konvertierung CellArray in PointCloud-Objekt
cellarray2mat.m	Konvertierung CellArrays in Matlab-Datei
db3files2mergedPC.m	Lesen der ROSbagMessages, Zusammenfügen mehrerer db3-Dateien
handleMatSaveSelection.m	Benutzeroberfläche für Abfrage, ob mat-Datei erstellt werden soll
handleOusterResolution.m	Benutzeroberfläche für Abfrage, welche Ouster-Auflösung eingestellt ist
handleSensorSelection.m	Auswahl des Laserscanners
mergeLvxPCs.m	fügt beliebig viele Punktwolken zusammen, bei Bedarf Datenreduzierung
lvx2PC.m	Konvertierung lvx-Datei in PointCloud-Objekt [17]

Anlagen

pcap2PC.m	Konvertierung pcap-Datei in PointCloud-Objekt
pcd2PC.m	Konvertierung pcd-Dateien in PointCloud-Objekt
raw2readable.m	zentrales Skript zum Einlesen und Konvertieren der Messdatei(en)
Kennzeichenerkennung	
main_licenseplates.m	Hauptskript, Aufruf der Unterskripte
classification.m	Klassifizierung eines Clusters als Kennzeichen
intDistributionClustering.m	Form- und Intensitätsverteilungsanalyse eines Clusters
oultierRemoval.m	Entfernen der Ausreißer am Trägerobjekt
selectMiddleCluster.m	wählt Cluster, welches Trägerflächenmittelachse am nächsten ist
sortClustering.m	Clustermethode (Nutzen des Strahlengangs)
vehicleSegmentation.m	Segmentierung des Trägerobjekts
visualInt.m	Visualisierung der Häufigkeitsverteilung der Bestrahlungsstärke
visualPC.m	Visualisierung der segmentierten Punktwolken
Verschmutzungerkennung	
main_pollution.m	Hauptskript, wiederholtes Aufrufen der Unterskripte
pollution.m	Abschätzung der Verschmutzung
Witterungserkennung	
main_weather.m	Hauptskript, wiederholtes Aufrufen der Unterskripte
objInRoi.m	Ermitteln, ob Objekt in Beobachtungsquader
raindropsNoiseCount.m	Abschätzung des Niederschlags
wetRoadDetction.m	Ermitteln, ob nasse Fahrbahn