

DETEKTION UND DISKRIMINIERUNG UNTERSCHIEDLICHER BEDECKUNGEN AUF ABSCHLUSSSCHEIBEN VON LIDAR-SENSOREN

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Phys. Manuel Trierweiler
geb. in Wittlich

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2021

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	3
1.2	Ziele und Aufbau der Arbeit	5
2	Theoretische Grundlagen	9
2.1	Light Detection and Ranging	9
2.1.1	Messprinzip	11
2.1.2	3D-Umfeldererkennung	15
2.2	Reichweite von LiDAR-Sensoren	18
2.2.1	Geometriefaktor	19
2.2.2	Rückstreuung	20
2.2.3	Atmosphärische Abschwächung	22
2.2.4	Verunreinigungen auf LiDAR-Sensoren	23
2.2.5	Leistungsbilanz und Sensorreichweite	25
3	Einfluss von Verunreinigungen auf LiDAR-Systeme	29
3.1	Bisherige Arbeiten und Literatur	30
3.2	Verschmutzungsproben und Extinktion	33
3.2.1	Verschmutzungsproben	33
3.2.2	Charakterisierung der Proben	37
3.3	Degradation der Sensorreichweite	41
3.3.1	Aufbau und Messprinzip	42
3.3.2	Datenauswertung	45
3.3.3	Sensorreichweite und Transmissionsverlust	55
3.3.4	Einfluss von Regentropfen	60
3.3.5	Interpretation und Ausblick	62

4	Detektion von Verunreinigungen: Möglichkeiten und Auswahlverfahren	67
4.1	Stand der Technik	68
4.1.1	Kamerabasierte Regensensoren	68
4.1.2	TIR-Regensensor	72
4.1.3	Elektronische Regensensoren	81
4.1.4	Akustische Regensensoren	86
4.2	LiDAR-Daten zur Schmutzdetektion	89
4.3	Interne Totalreflexion und Lichtleitung	92
4.3.1	Interpretation des Verschmutzungsgrades	101
4.3.2	Reale Bedingungen	107
4.4	Rückstreubasierte Methoden	114
4.4.1	Reale Bedingungen	121
4.5	Analyse der Detektionsmethoden	126
5	Detektion von Verunreinigungen mit TIR	131
5.1	TIR-Refraktometer	132
5.1.1	Systemaufbau und Datenauswertung	134
5.1.2	Kalibrierung des Systems	148
5.1.3	Verifizierung der Messgenauigkeit	152
5.1.4	Reale Bedingungen	158
5.2	Vollautomatisiertes Reinigungssystem	161
5.2.1	Systemauslegung I: Schmutzdetektion	166
5.2.2	Systemauslegung II: Kombination mit Reinigungssystem	174
5.2.3	Schmutzdetektion und Interpretation	177
5.2.4	Reinigungsentscheidung	189
5.2.5	Diskussion	193
6	Zusammenfassung und Ausblick	199
	Literaturverzeichnis	207

A Anhang	221
A.1 Verschmutzungsproben	221
A.2 Lichtleitung in der Schutzscheibe: Simulation	226
Abkürzungen	241
Betreute Arbeiten	243
Publikationen	245
Danksagung	247

KAPITEL 1

EINLEITUNG

Als eines der aktuell bedeutendsten Ziele in der Automobilbranche gilt die Entwicklung hochautomatisierter Fahrzeuge, in denen der Fahrer Schritt für Schritt durch den Einsatz moderner Technologien ersetzt wird. Neben der damit verbundenen Erhöhung an Komfort wird eine deutliche Reduzierung an Verkehrsunfällen und somit eine Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr erwartet. Zum Erreichen dieses Ziels werden Sensoren benötigt, die sowohl Objekte (z.B. Straßenschilder oder Fahrzeuge) als auch Personen erkennen und mit der gewonnenen Information die Steuerung des Fahrzeugs ermöglichen.

Bereits heute werden immer mehr Fahrerassistenzsysteme (engl. Advanced Driver Assistance Systems, kurz ADAS) in Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse verbaut. Zur Erfassung der Fahrzeugumgebung wird eine Vielzahl verschiedener Sensoren verwendet, die aufgrund unterschiedlicher Vor- und Nachteile auch unterschiedliche Aufgaben übernehmen können [1]. Zu den relevanten Systemeigenschaften zählen neben der Auflösung insbesondere die Reichweite im damit verbundenen Sichtbereich (engl. Field of View, kurz FoV) des Sensors. Ein Überblick der verwendeten Sensorsysteme mit einer skizzierten Einteilung des dazugehörigen FoV ist in Abbildung 1.1 gegeben. Zur Überwachung der näheren Fahrzeugumgebung werden Ultraschall-Sensoren eingesetzt, die sich aufgrund der geringen Reichweite, aber hohen Genauigkeit, besonders als Parkassistent eignen. Für die Objekterkennung in größeren Distanzen werden elektromagnetische Sensoren verwendet. So nutzen Radar (engl. radio detection

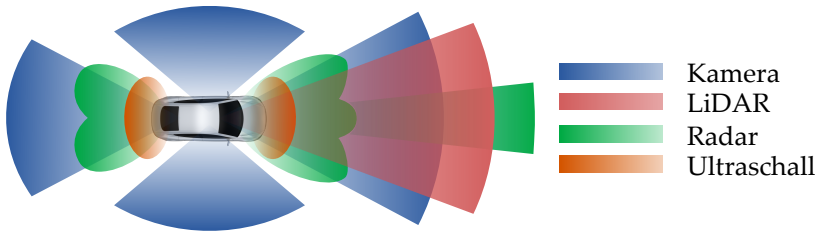


Abbildung 1.1: Fahrerassistenzsysteme zur Erfassung der Fahrzeugumgebung mit jeweiligem Sichtbereich, aufgeteilt nach Sensortyp (Kamera, LiDAR, Radar und Ultraschall).

and ranging)-Sensoren Strahlung im Mikrowellenbereich mit unterschiedlichen Frequenzen. Je nach Auslegung werden Radar-Systeme im Nahbereich für die Überwachung von toten Winkeln oder zur Kollisionswarnung genutzt, während der sogenannte Long-Range-Radar mit Reichweiten bis zu 200 m als Abstandsregeltempomat (engl. adaptive cruise control, kurz ACC) verwendet wird [2]. Im Gegensatz zu Radar-Sensoren werden Mono- oder Stereo-Kameras zur Überwachung eines großen Sichtbereiches verbaut und eignen sich aufgrund der hohen Bildauflösung für viele Anwendungen wie die Erkennung von Verkehrsschildern, Fahrzeugen und Passanten oder als Spurhalteassistent.

Ein Nachteil von Kameras liegt in der hohen Einschränkung bei schlechten Lichtverhältnissen, da die Kamera als passiver Sensor auf die Detektion von Streustrahlung wie beispielsweise Sonnenlicht angewiesen ist. Im Gegensatz dazu werden vermehrt LiDAR (engl. Light Detection and Ranging)-Sensoren entwickelt, die als aktives System selbst elektromagnetische Strahlung in Form von Laserpulsen im Infrarotbereich aussenden. Der wesentliche Vorteil von LiDAR-Sensoren ist die Erzeugung von 3D-Daten der Umgebung mit hoher Auflösung bei gleichzeitig hohen Reichweiten. Die vorliegende Arbeit

befasst sich mit der Untersuchung von LiDAR-Sensoren, speziell im Hinblick auf auftretende Probleme durch Umgebungseinflüsse wie die Anlagerung von Verunreinigungen und liefert mögliche Ansätze zur Problemlösung.

1.1 MOTIVATION

Durch das Aussenden elektromagnetischer Strahlung in die Umgebung zur Beleuchtung der Objekte sind LiDAR-Sensoren nicht auf äußere Lichtquellen angewiesen. Dennoch entstehen durch diese Methodik andere Probleme, die auf der Wechselwirkung der ausgesendeten Strahlung mit Störpartikeln in der Umwelt beruhen. Dabei werden nach Abbildung 1.2 zwei Wechselwirkungen unterschieden.

Einerseits wechselwirkt die Strahlung direkt mit Niederschlag in der Luft (1). Dazu zählen beispielsweise Regentropfen, Schnee, Hagel oder auch Nebel. Auftretende Effekte sind die Brechung und Streuung der Strahlung an den Partikeln oder Tropfen, die in einer Winkeländerung der sich ausbreitenden Strahlung resultiert. Die Szenerie wird dann möglicherweise nicht mehr homogen beleuchtet, sodass nur noch ein Bruchteil der ursprünglichen Strahlungsleistung genutzt werden kann. Als Folge reduziert sich auch die zurückgestreute Strahlungsleistung und damit die Reichweite des Sensors. Der Effekt verdoppelt sich gleichermaßen auf dem Rückweg vom Objekt zum Detektor, auf dem die Störpartikel die Nutzstrahlung erneut streuen. Die Verwendung von LiDAR-Sensoren bei schwierigen Wetterbedingungen bringt somit viele Herausforderungen mit sich, die bei der Auslegung des gesamten Sensorsystems im Fahrzeug berücksichtigt werden müssen.

Um die Sensorelemente wie die Lichtquelle, den Detektor oder auch die optischen Elemente vor dem Niederschlag zu schützen, wird der

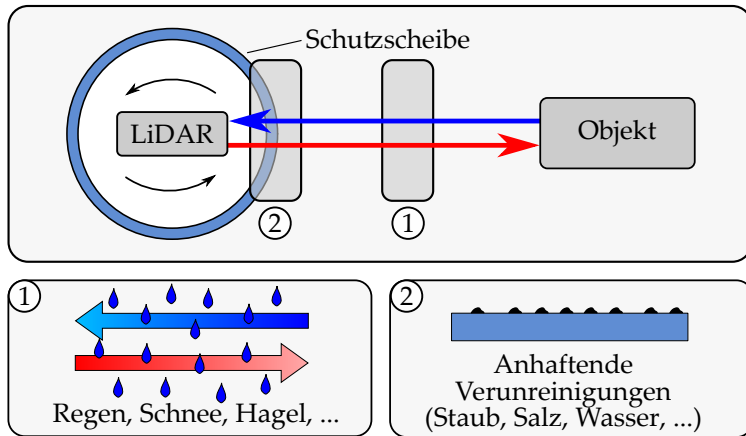


Abbildung 1.2: Auftretende Leistungseinschränkungen durch die Verwendung von LiDAR-Sensoren bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen. Zum einen wird die gesendete und empfangene Strahlungsleistung durch die Wechselwirkung mit Niederschlag wie Regen, Schnee oder Hagel reduziert (1). Zusätzlich lagern sich Tropfen oder andere Schmutzpartikel an der Sensorschutzscheibe an und sorgen für eine weitere Reduzierung der Strahlungsleistung (2).

Sensor mit einer Schutzscheibe aus Kunststoff oder Glas umgeben. Feuchtigkeit oder Staubpartikel können dann nicht mehr ins Sensorinnere eintreten. Dennoch lagern sich Wassertropfen oder verschiedene Verschmutzungspartikel auf der Oberfläche der Scheibe selbst an und verschlechtern die optischen Eigenschaften des Sensors (2). Dadurch reduziert sich analog zum Einfluss von Niederschlag ebenfalls die Strahlungsleistung bei Propagation durch die Schutzscheibe hindurch. Der Effekt tritt auch hier sowohl auf dem Weg zum Objekt als auch auf dem Rückweg zum Detektor auf und ist durch die gleichen optischen Effekte wie Brechung und Streuung bedingt. Die Anlagerung der Partikel erfolgt kumulativ, sodass bei längerer Fahrt oder auch im Stillstand des Fahrzeugs die Leistungseinschränkung zunimmt.

Sowohl Niederschlag in der Luft als auch sich anlagernde Partikel oder Tropfen erzeugen somit gleichermaßen eine Reduzierung der Performance des LiDAR-Sensors. Dennoch besteht ein fundamentaler Unterschied zwischen den beiden Effekten. Während der Niederschlag in der Luft immer zu einer Leistungseinschränkung führt, können Anlagerungen an der Schutzscheibe durch eine Sensorreinigung entfernt und damit der Grundzustand wiederhergestellt werden. Als Reinigungsmechanismus bietet sich die von Windschutzscheiben bekannte Scheibenwischer-Spritzwasser-Kombination an, die auf LiDAR-Systeme übertragen werden kann.

Aus der beschriebenen Thematik folgen mehrere bisher unbeantwortete Fragestellungen, die in dieser Arbeit untersucht werden. Erstere befasst sich mit der Quantifizierung der genannten Reduzierung der Sensorperformance durch die Anlagerung von Verunreinigungen. Durch die Quantifizierung kann die wichtige Frage beantwortet werden, ob eine Sensorreinigung sinnvoll und notwendig ist. Um gegebenenfalls das Reinigungssystem zu steuern, muss der Zustand der Sensorschutzscheibe überwacht werden, da im Gegensatz zur Überwachung der Windschutzscheibe der Fahrer die Aufgabe nicht übernehmen kann. Das zweite Arbeitspaket beinhaltet die Evaluierung verschiedener Möglichkeiten zur Detektion genannter Verunreinigungen auf der Sensorschutzscheibe.

1.2 ZIELE UND AUFBAU DER ARBEIT

Im Rahmen dieser Arbeit werden die genannten Fragestellungen bezüglich der Quantifizierung des Verschmutzungseinflusses auf LiDAR-Systeme sowie die Evaluierung der Möglichkeiten zur Schmutzdetektion untersucht. Darüber hinaus wird eine neue Methode vorgestellt,

mit der anhaftende Partikel oder Tropfen auf transparenten Oberflächen anhand ihres Brechungsindex charakterisiert werden können. Diese Methode erlaubt die vollautomatisierte Steuerung eines Reinigungssystems bestehend aus Scheibenwischer und Spritzdüsen.

Zur Quantifizierung der Degradation der Sensorleistung ist ein tiefes Verständnis der Funktionsweise von LiDAR-Sensoren notwendig. Dazu werden die Grundlagen von LiDAR-Sensoren in Kapitel 2 vorgestellt. Hier wird zwischen verschiedenen Technologien unterschieden, die eine Abstandsmessung von Objekten in der Umgebung ermöglichen. Speziell für LiDAR-Sensoren wird eine Abschätzung gegeben, wie die optischen Eigenschaften der Schutzscheibe sich durch anhaftende Verunreinigungen verändern. Im Fokus steht anschließend die Verknüpfung des Verschmutzungsgrades in Form einer reduzierten Transmission mit der Leistungsbilanz von LiDAR-Sensoren, die die Grundlage für die darauffolgenden experimentellen Untersuchungen bildet.

Die experimentelle Verifizierung der theoretisch hergeleiteten Verknüpfung von Verschmutzungsgrad und Sensorleistung wird in Kapitel 3 durchgeführt. Dazu müssen im ersten Schritt Verschmutzungssituationen nachgestellt werden, die in der Realität auftreten können. Diese beinhalten die Untersuchung der am häufigsten auftretenden Verunreinigungen aus Staub, Pollen, Salz und Wasser sowie entstehende Kratzer in der Oberfläche der Schutzscheibe. Ein Teilziel des Kapitels ist die Quantifizierung des Verschmutzungsgrades, die experimentell durch die Messung der Proben-Transmission bestimmt wird. Die dreidimensionale Umgebungsinformation, die der LiDAR-Sensor generiert, wird in sogenannten Punktwolken dargestellt, in denen der Einfluss durch die Verunreinigungen nicht direkt abgelesen werden kann. Deshalb wird ein Verfahren zur Bestimmung dieses Einflusses aus definierten Systemparametern entwickelt. Als einer der

wichtigsten Systemparameter eines LiDAR-Sensors wird die maximale Reichweite als Referenzgröße herangezogen, die mit dem vorgestellten Verfahren aus einer Vielzahl an Punktwolken statistisch ausgewertet werden kann. Aus dem Zusammenhang zwischen der maximalen Sensorreichweite und dem Verschmutzungsgrad wird im Anschluss die Frage nach der Notwendigkeit eines Reinigungssystems für LiDAR-Sensoren beantwortet.

Wird ein Reinigungssystem in LiDAR-Sensoren integriert, so wird ebenfalls eine Möglichkeit zur Steuerung der Reinigung benötigt. Zumindest teilweise bekannt sind dazu verwendete Methoden bereits von Regensensoren an Windschutzscheiben. Diese ermöglichen die Steuerung der Scheibenwischer, während die Spritzdüsen durch den Fahrer ausgelöst werden. Die Verwendung solcher bekannter Systeme zur Detektion von Verunreinigungen wird in Kapitel 4 untersucht. Dabei werden zuerst verschiedene aus der Literatur bekannte Technologien vorgestellt und anhand ihrer Übertragbarkeit auf LiDAR-Sensoren evaluiert. Im Vergleich der unterschiedlichen Technologien werden verschiedene Parameter wie die Empfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen (Vibrationen, Temperatur und Hintergrundstrahlung) oder auch die Systemkosten berücksichtigt. Die auf LiDAR-Systeme übertragbaren Methoden werden im Anschluss experimentell bezüglich der genannten Parameter untersucht und wiederum miteinander verglichen. Die Testsysteme werden hierbei so konzipiert, dass diese speziell in rotierenden LiDAR-Scannern eingesetzt werden und die Rotation zur Auflösung des Verschmutzungsgrades entlang der Rotationsachse nutzen können. In einer finalen Analyse wird das Potential der verschiedenen Methoden evaluiert und eine Empfehlung für die Verwendung in LiDAR-Sensoren gegeben.

Keines der aktuell verfügbaren Systeme zur Detektion von Verunreinigungen eignet sich für die Steuerung einer Kombination von Schei-

benwischern und Spritzdüsen. Dazu wird eine Möglichkeit benötigt, zwischen der Art der anhaftenden Verunreinigung zu unterscheiden. In Kapitel 5 wird daher das Ziel verfolgt, die vielversprechendste der vorgestellten Methoden um genau diese Funktionalität zu erweitern. Hierbei wird zuerst definiert, welche Materialeigenschaften erkannt werden müssen, um eine Unterscheidung treffen zu können. Zunächst wird dazu ein Testsystem entwickelt, das auf die Bestimmung des Brechungsindex der anhaftenden Materialien ausgelegt ist. Im Anschluss wird dieses System so optimiert, dass nur eine binäre Unterscheidung zwischen festen und flüssigen Verunreinigungen erfolgt. Daraus wird wiederum die Notwendigkeit von Spritzwasser vor einem folgenden Wischvorgang bestimmt. Das vorgestellte Konzept erfüllt alle notwendigen Voraussetzungen für die Integration in einen LiDAR-Sensor und eignet sich als eigenständiger Sensor für die vollautomatisierte Steuerung einer Scheibenwischer-Spritzdüsen-Kombination.

KAPITEL 2

THEORETISCHE GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden die im Verlauf der Arbeit benötigten theoretischen Grundlagen zusammengefasst. Zu Beginn werden LiDAR-Sensoren in ihrer Funktionsweise und den daraus resultierenden Anwendungen vorgestellt. Da sich die Arbeit mit dem Kontext des hochautomatisierten Fahrens beschäftigt, wird die Vorstellung unterschiedlicher LiDAR-Typen auf die Verwendung im Fahrzeug beschränkt. Aus der Theorie wird im Anschluss der physikalische Zusammenhang zwischen dem Empfangssignal eines solchen Sensors und der maximalen Reichweite hergeleitet, der für die im Laufe der Arbeit folgenden Ergebnisse relevant sein wird. Der Zusammenhang beinhaltet alle wichtigen Systemparameter des Sensors, ist aber noch nicht mit Wettereinflüssen verknüpft. Haften durch Regen oder aufwirbelnden Straßenschmutz Tropfen oder Partikel auf der Sensorschutzscheibe an, so treten Streueffekte und Transmissionsverluste auf, die sich direkt auf die Systemreichweite auswirken. Im letzten Abschnitt des Kapitels werden diese Wechselwirkungen beschrieben und als Verlustanteil in der Berechnung der Systemreichweite integriert.

2.1 LIGHT DETECTION AND RANGING

LiDAR ist ein aktives, optisches Messverfahren, das durch Senden und Empfangen elektromagnetischer Strahlung Eigenschaften von

Objekten in der Umgebung erfasst. Dazu zählen chemische Eigenschaften von Gasen oder Aerosolen [3], aber auch die Distanz zwischen Sensor und Messobjekt. Neben klassischen Anwendungen wie der Analyse der Atmosphäre [4] rückt immer mehr die Nutzung von LiDAR-Sensoren zur Objekterfassung in hochautomatisierten Fahrzeugen in den Vordergrund [5, 6]. Der schematische Aufbau eines LiDAR-Sensors ist in Abbildung 2.1 skizziert. Durch ein Sendeobjektiv (Tx) trifft Laserstrahlung auf ein Objekt in der Umgebung, wird dort zurück in Richtung eines Empfangsobjektivs (Rx) gestreut oder reflektiert und auf einem Detektorelement gesammelt. Der genaue Sensortyp kann sich in vielerlei Hinsicht unterscheiden. Für die Bestimmung der Distanzen von Objekten in der Fahrzeugumgebung eignen sich verschiedene LiDAR-Messverfahren, die im ersten Unterabschnitt dieses Kapitels vorgestellt werden. Mittels dieser Techniken kann die Distanz eines einzelnen, festen Objektpunkts bestimmt werden. Die Erweiterung auf eine 3D-Umfelderkenntnis erfordert den Einsatz zusätzlicher, meist beweglicher Komponenten, die eine weitere Unterteilung von LiDAR-Sensoren darstellt. Die verschiedenen Sensortypen unterscheiden sich grundlegend in ihren Vor- und Nachteilen und werden deshalb im darauffolgenden Unterabschnitt vorgestellt. Eine genauere Untersuchung ist beispielsweise in [7] gegeben.

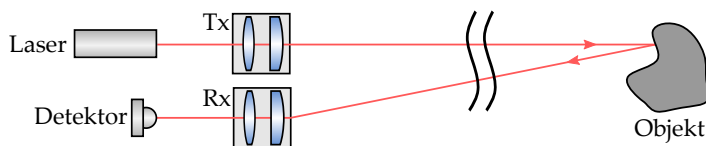


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines LiDAR-Sensors. Laserstrahlung wird mit einem Sendeobjektiv (Tx) zu den Objekten in der Umgebung ausgesendet und streut vom Objekt zurück. Mit einem Empfangsobjektiv (Rx) wird die Strahlung auf einem photoempfindlichen Detektor gesammelt und gemessen.

2.1.1 MESSPRINZIP

LAUFZEITMESSUNG (TOF)

Um mit dem in Abbildung 2.1 gezeigten Prinzip eine Distanzmessung durchzuführen, können verschiedene Methoden angewandt werden. Die einfachste und am weitesten verbreitete Methode ist die direkte Laufzeitmessung (engl. time-of-flight, kurz ToF). Der Sensor emittiert Laserstrahlung in Form kurzer Pulse im Nanosekundenbereich (Abbildung 2.2a). Die Leistung der vom Objekt zurück in Richtung Detektor gestreuten Pulse wird dann zeitlich versetzt zum Sendepuls gemessen. Aus der Zeitdifferenz Δt zwischen Sende- und Empfangspuls wird die Distanz d des Objekts berechnet mit

$$d = \frac{c\Delta t}{2}, \quad (2.1)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum bezeichnet. Der Faktor $\frac{1}{2}$ folgt daraus, dass die Pulse durch den Hin- und Rückweg die doppelte Distanz zurücklegen. Um eine hohe Distanzgenauigkeit zu erzielen, werden möglichst kurze Pulse verwendet. Da die ausgesendete Strahlungsleistung durch Augensicherheitskriterien limitiert ist, können mit kurzen Pulsdauern hohe Spitzenleistungen und damit auch höhere Reichweiten erzielt werden. Aufgrund der großen Verfügbarkeit von Silizium-Photodetektoren nutzen ToF-LiDAR-Sensoren im Automobilbereich meist Laserstrahlung bei einer Wellenlänge von 850 nm oder 905 nm [8]. Gepulste LiDAR-Sensoren sind generell durch das Signal-Rausch-Verhältnis (engl. signal-to-noise ratio, kurz SNR) limitiert, da aufgrund der kurzen Pulslängen eine hohe Detektorbandbreite benötigt wird, die wiederum mit erhöhtem Rauschen verknüpft ist [9, 10]. Übliche Reichweiten gepulster ToF-LiDAR-Systeme im Automobilbereich liegen zwischen 100 m und 200 m [11, 12].

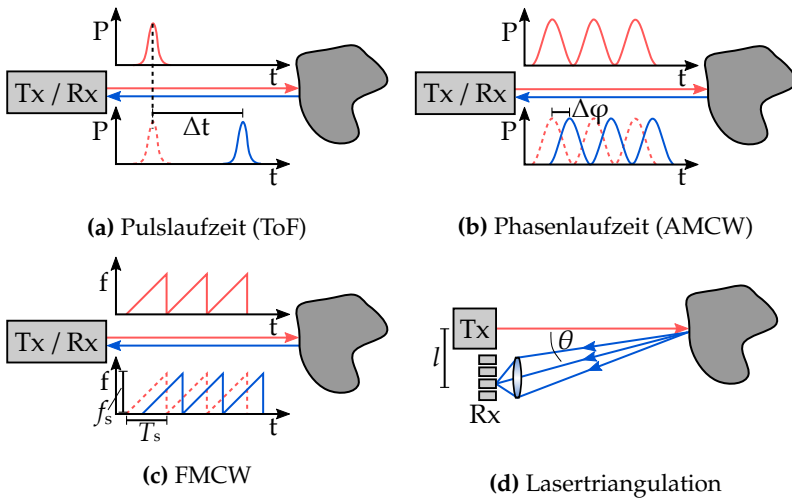


Abbildung 2.2: Verschiedene Messprinzipien zur Bestimmung der Objektdistanzen. In der direkten Laufzeitmessung (ToF, a) wird Licht in Form von Laserpulsen moduliert, sodass die Distanz aus der Lichtlaufzeit bestimmt werden kann. Alternativ kann auch die Leistung kontinuierlicher Laserstrahlung moduliert werden, um die Distanz aus der Phasenlaufzeit zu bestimmen (AMCW, b). An Stelle der Amplitude kann auch die Frequenz moduliert werden, sodass aus der Frequenzverschiebung die Distanz zurückgerechnet werden kann (FMCW, c). Ein vollständig anderer Ansatz ist durch die Triangulation gegeben, bei der geometrisch der Winkel zwischen Detektorpixel und Objekt Aufschluss über die Distanz gibt (d).

PHASENLAUFZEITMESSUNG (AMCW)

Neben der direkten Messung der Zeitdifferenz zwischen zwei kurzen Pulsen kann die Strahlungsleistung eines kontinuierlichen Lasers (engl. continuous-wave, kurz cw) periodisch moduliert werden (Abbildung 2.2b). Das modulierte Signal streut analog zur ToF-Messung am Objekt und wird zeitlich aufgelöst gemessen. Da keine einzelnen Pulse

voneinander getrennt werden, erfolgt die Bestimmung der Distanz d über die Phasenverschiebung $\Delta\phi$ des modulierten Signals gemäß

$$d = \frac{c \Delta\phi}{2 \cdot 2\pi f}. \quad (2.2)$$

Die Größe $\Delta\phi$ bezeichnet dabei die gemessene Phasenverschiebung und f die Modulationsfrequenz. Die Methode wird als Phasenlaufzeitmessung oder amplitude-modulated continuous-wave (kurz AMCW) bezeichnet. Der Bereich an messbaren Distanzen wird durch die Wahl der Modulationsfrequenz limitiert, da sich bei Distanzen größer einer Periode das Messsignal wiederholt. Eine kleine Modulationsfrequenz liefert nach Gleichung (2.2) einen größeren Messbereich. Gleichzeitig sinkt mit kleinerer Frequenz die Distanzauflösung, sodass immer ein Kompromiss zwischen Reichweite und Auflösung getroffen werden muss. Üblicherweise verwendete Modulationsfrequenzen in AMCW-Systemen liegen in der Größenordnung von 10 MHz [7, 13, 14] mit daraus resultierenden Reichweiten von 15 m.

FMCW

Alternativ zur Modulation der Amplitude kann auch die Frequenz der ausgesendeten Strahlung zeitlich moduliert werden. Das Verfahren wird als frequency-modulated continuous-wave (kurz FMCW) bezeichnet (Abbildung 2.2c). Die Modulation der Frequenz erfolgt meist sägezahn- oder dreieckförmig [7]. Unter der Voraussetzung einer kohärenten Lichtquelle interferiert die Streustrahlung mit der ausgesendeten Strahlung periodisch konstruktiv und destruktiv. Die Frequenz des Interferenzsignals wird als Schwebungsfrequenz f_b bezeichnet. Die Schwebungsfrequenz wird mit einer schnellen Fourier-Transformation (engl. fast Fourier transform, kurz FFT) aus dem Zeitsignal bestimmt,

sodass daraus die Distanz zum Objekt ausgewertet werden kann gemäß

$$\frac{\Delta t}{T_s} = \frac{f_b}{f_s} \stackrel{(2.1)}{\Rightarrow} d = \frac{c f_b T_s}{2 f_s}. \quad (2.3)$$

Die beiden Größen T_s und f_s beschreiben das Zeitintervall und die Bandbreite des Frequenzweeps. Ein großer Vorteil von FMCW-Systemen ist, dass neben der Distanzmessung gleichzeitig auch die Geschwindigkeit des Objekts direkt aus dem Schwebungssignal ermittelt werden kann [15]. Nachteile von FMCW-Systemen hingegen liegen in der oft schwierigen Realisierung eines linearen Frequenzweeps [16] oder der Verfügbarkeit an Lichtquellen mit einer hinreichend großen Kohärenzlänge.

LASERTRIANGULATION

Im Gegensatz zu den bisher gezeigten Messmethoden wird die Distanz bei der Lasertriangulation (Abbildung 2.2d) rein geometrisch ermittelt. Die Laserstrahlung wird nach der Streuung am Objekt mit einer Linse auf einen Zeilendetektor (z.B. eine CCD-Zeile) abgebildet. Abhängig von der Distanz des Objekts zum Detektor ändert sich der Winkel θ zwischen einfallendem und rückläufigem Strahl und damit auch der Fokuspunkt der Linse. Die Distanz kann dann aus dem Abstand von Laser und beleuchtetem Detektorpixel bestimmt oder aus einer kalibrierten Lookup-Tabelle ausgelesen werden [17]. Bei fester Detektorgeometrie wird durch die Wahl der Basislänge l immer ein Kompromiss zwischen maximaler Distanz und Distanzauflösung getroffen. So bildet die Linse bei kleiner Basislänge Reflexionen von unterschiedlichen Distanzen näher beieinander ab, sodass eine hohe maximale Reichweite bei gleichzeitig geringer Auflösung resultiert [18].

Alle vorgestellten Methoden haben bestimmte Vor- und Nachteile, die auf die jeweilige Anwendungen angepasst werden müssen. Für die Anwendungen im Automobil haben sich weitestgehend ToF und FMCW LiDAR-Sensoren durchsetzen können, da die Phasenlaufzeitmessung zu anfällig für Hintergrundstrahlung ist und die maximale Reichweite bei der Lasertriangulation zu stark eingeschränkt ist.

2.1.2 3D-UMFELDERKENNUNG

Die gezeigten Prinzipien beschreiben unterschiedliche Methoden zur Messung der Distanz eines festen Objektpunktes. Der Einsatz von LiDAR-Sensoren im Automobilbereich zielt allerdings auf die Erfassung der gesamten Fahrzeugumgebung ab. Die Prinzipien müssen deshalb so erweitert werden, dass die punktuelle Distanzmessung auf das gewünschte Sichtfeld (FoV) ausgedehnt wird. Dazu sind verschiedene Methoden bekannt, von denen die am weitest verbreiteten hier kurz vorgestellt werden. Die erste Kategorie beschreibt scannende Systeme, in denen das FoV durch eine mechanische Bewegung einer oder mehrerer Komponenten sukzessive abgetastet wird (Abbildung 2.3a). Die bewegliche Komponente ist meist mit einer optischen Umlenkeinheit verbunden, die die Laserstrahlung ablenkt. So werden beispielsweise zwei zueinander verkippte Galvanometer-Spiegel verwendet, um die 2D-Bewegung des Laserstrahls durchzuführen [19, 20]. Aufgrund der kleinen Bauform im Bereich weniger Millimeter werden vermehrt auf mikro-(opto-)elektro-mechanischen Systemen (kurz M(O)EMS) basierte Mikrospiegel für die Entwicklung von LiDAR-Sensoren eingesetzt [21, 22]. Diese können durch eine Schwingbewegung um bis zu zwei Achsen einen fest definierten Raumwinkel abdecken. Für scannende Systeme reicht ein einzelnes Detektorelement aus, um nacheinander die Objekte in der Umgebung zu erfassen.

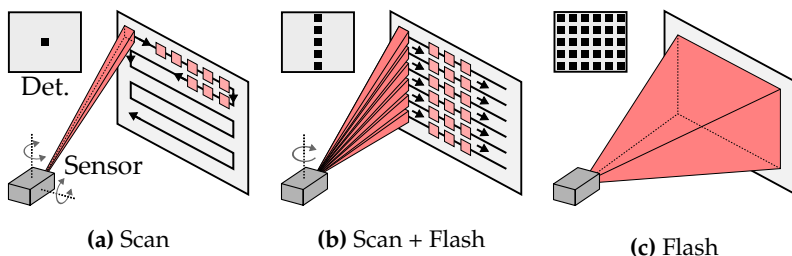


Abbildung 2.3: Abtasten der Umgebung durch eine Scanbewegung, ausgelöst durch die mechanische Bewegung, die meist an eine optische Ablenkeinheit gekoppelt ist (a). Bei einer Rotation entlang einer Rotationsachse wird das FoV horizontal gescannt. Die Erweiterung in vertikaler Richtung kann durch mehrere Sende- und Detektoreinheiten erfolgen (b). Durch Erweiterung des Detektors zu einem 2D-Array kann auf die mechanische Bewegung verzichtet werden (c).

Eine Alternative zur komplexen Schwingbewegung ist durch die Rotation einer oder mehrerer Komponenten um eine einzelne Rotationsachse gegeben. Das FoV wird damit senkrecht zur Rotationsachse erweitert. Diese entspricht meist der Fahrzeugnormalen, sodass das Sichtfeld horizontal erweitert wird. Da das FoV aber ebenfalls in vertikaler Raumrichtung interessant ist, wird die Information meist durch zusätzliche Laserdioden und Detektorelemente in vertikaler Richtung mit unterschiedlichen Abstrahlwinkeln gewonnen (Abbildung 2.3b). Eine mögliche Variante sind Systeme mit rotierendem Spiegel zur Strahlableitung. State-of-the-art Systeme mit rotierendem Spiegel sind beispielsweise die Sensoren Ibeo Lux [23] oder Sick LD-MRS [24] mit einem horizontalen FoV von 110° . Am weitesten verbreitet im Automobilbereich sind vollständig rotierende Scanner, in denen sowohl Sende- als auch Empfangseinheit um 360° rotieren und damit ein horizontales FoV von 360° generiert wird [25, 26]. Die Anzahl an vertikalen Ebenen kann beliebig angepasst werden, sodass beispielsweise der

Sensor OS0 (Ouster, Inc.) mit 32, 64 oder 128 Elementen konfiguriert werden kann und damit ein vertikales FoV von 90° abdeckt [27].

Neben scannenden oder teilscannenden Verfahren existieren auch reine Flash-LiDAR-Systeme, die das gesamte FoV simultan beleuchten. Dadurch wird eine hohe Strahlungsenergie benötigt, die in einer hohen Strahlungsdichte direkt an der Sensorschutzscheibe resultiert. Aufgrund der Limitierung durch die Augensicherheit ist deshalb entweder die Reichweite oder das FoV im Vergleich zu scannenden Systemen deutlich eingeschränkt. Die Auflösung der Systeme ist durch die Anzahl der Detektorpixel definiert, die als Array angebracht werden (Abbildung 2.3c).

Eine alternative Unterteilung der Sensortypen ist durch die Unterscheidung zwischen mechanischen und Festkörper-LiDAR-Systemen gegeben. Während mechanische Systeme auf beweglichen Komponenten beruhen (rotierende Scanner, rotierender Spiegel), weisen die Festkörper-Systeme erheblich geringere Verschleißeffekte auf. Beispiele für Festkörper-LiDAR sind die bereits beschriebenen Mikrospiegelsysteme oder auf Optical Phased Arrays (kurz OPA) beruhende Sensoren, in denen die Strahlablenkung durch Interferenz phasenverschobener Wellenzüge in Wellenleitern erzeugt wird [28].

Neben den hier vorgestellten LiDAR-Typen existieren noch viele weitere Methoden, die in dieser Arbeit nicht näher vorgestellt werden. Eine ausführliche Ergänzung ist beispielsweise in [29] zu finden. Jeder Sensortyp hat dabei gewisse Vor- und Nachteile. In dieser Arbeit werden ausschließlich rotierende LiDAR-Sensoren verwendet. Die vorgestellten Ergebnisse in den folgenden Kapiteln sind dabei teilweise auch auf andere Sensortypen übertragbar. Die in den Kapiteln 4 und 5 entwickelten Systeme zur Schmutzdetektion sind allerdings direkt auf die Nutzung in rotierenden Systemen ausgelegt.

2.2 REICHWEITE VON LIDAR-SENSOREN

Im vorherigen Abschnitt wurden verschiedene Methoden zur Distanzmessung bereits vorgestellt. Durch die unterschiedlichen Verfahren zur Bildgebung war der Fokus auf das vom Verfahren erreichbare FoV gelegt. Neben dem Sichtbereich des Sensors spielt in der Entwicklung von LiDAR-Sensoren für den Automobilbereich die maximale Sensorreichweite eine wichtige Rolle. In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen maximaler Reichweite und Strahlungsleistung hergeleitet. Dieser wird im späteren Verlauf der Arbeit dazu benötigt, den Einfluss von Verunreinigungen auf die Sensorreichweite direkt zu evaluieren.

Grundsätzlich erfolgt die Bestimmung der Sensorreichweite über eine Leistungsbilanz von ausgesandter und empfangener Strahlung. Dabei müssen neben festen Systemparametern auch Leistungsverluste auf dem Weg zwischen Sensor und Objekt betrachtet werden. Zur Beschreibung wird sich in weiten Teilen an [30] und [3] orientiert, wobei die Anwendung direkt auf die Rückstreuung an Objekten im Straßenverkehr ausgerichtet ist. Wird Strahlung mit der Strahlungsleistung P_S zum Objekt ausgesendet, so wird der zurückreflektierte bzw. -gestreute Anteil am Detektor mit der Strahlungsleistung

$$P_E = P_S G_o(d) R_o(d) \eta_{\text{atm}}^2(d) \eta_{\text{sys}} \quad (2.4)$$

empfangen. Die Größe $G_o(d)$ beschreibt einen Geometriefaktor abhängig von den Dimensionen des Messobjektes und $R_o(d)$ die Rückstreuung vom Objekt zum Empfangsobjektiv. Die beiden Größen η_{atm} und η_{sys} beschreiben den Verlust in der Atmosphäre sowie den Verlust durch feste Systemfaktoren wie beispielsweise Reflexionen an optischen Elementen. Zum besseren Verständnis werden die distanzabhängigen Größen im Folgenden genauer erklärt.

2.2.1 GEOMETRIEFAKTOR

Die vom LiDAR ausgehende Sendestrahlung ist meist divergent, um keine Objekte in der Umgebung zu übersehen und gleichzeitig auch die Anforderungen an die Augensicherheit gewährleisten zu können. Das empfangene Signal ist dann optimal, wenn das beleuchtete Objekt größer ist als der lokale Sendestrahldurchmesser. Der Geometriefaktor beschreibt das Verhältnis des Sendestrahldurchmessers zur Schnittfläche des Sendestrahls mit dem Objekt und wird anhand zweier Beispiele in Abbildung 2.4 erklärt. Die Sendeeinheit Tx erzeugt einen Sendestrahldurchmesser mit der Breite $b_s(d)$ und einer Fläche $A_s = \pi \left(\frac{b_s(d)}{2}\right)^2$. Die Schnittfläche σ von A_s mit dem Objekt kann je nach Größe und Form des Objektes sehr unterschiedlich sein, wenn beispielsweise das Objekt nur an einer Kante getroffen wird. Die Betrachtung hier beschränkt sich auf die zwei Fälle mit der Objektbreite $b_o \geq b_s$ in (a) und $b_o < b_s$ in (b), bei denen das Objekt entweder vollständig getroffen oder in jeder Raumrichtung überstrahlt wird. Der Geometriefaktor entspricht nun genau dem Verhältnis

$$G_o(d) = \frac{\sigma}{A_s}. \quad (2.5)$$

Für die Optimalbedingungen in Fall (a) gilt $\sigma = \pi \left(\frac{b_s}{2}\right)^2$. Die Distanzabhängigkeit kürzt sich damit weg, solange die Bedingung $b_o \geq b_s$ bei großen Abständen erhalten bleibt. Für den Geometriefaktor folgt dann $G_o = 1$. Im zweiten Fall in (b) entspricht σ der Fläche des Objekts. Für runde Objekte gilt $\sigma = \pi \left(\frac{b_o}{2}\right)^2$. Mit steigender Distanz bleibt σ konstant, während A_s aufgrund der Divergenz quadratisch wächst. Die quadratische Abhängigkeit überträgt sich dann auch auf den Geometriefaktor gemäß

$$G_o = \frac{b_o^2}{b_s^2} = \frac{b_o^2}{\tan(\theta_x) \tan(\theta_y) d^2}, \quad (2.6)$$

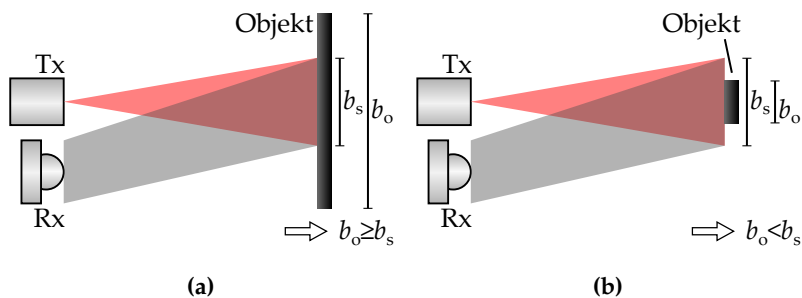


Abbildung 2.4: Zusammenhang von Schnittfläche σ des Sendestrahls der Breite b_s mit dem Objekt der Breite b_o . Ist das Objekt größer als der Strahldurchmesser, so treten keine weiteren Verluste auf und es gilt $G_o = 1$ (a). Wird das Objekt vollständig überstrahlt, so ändert sich der Geometriefaktor $\propto \frac{1}{d^2}$ (b).

wobei θ_x und θ_y die jeweiligen Divergenzwinkel der Sendestrahlung (horizontal und vertikal) beschreiben. Die beiden dargestellten Fälle zeigen die Grenzfälle auf mit $G_o = 1$ und $G_o \propto \frac{1}{d^2}$. In allen weiteren Fällen, in denen das Objekt nicht vollständig getroffen oder vollständig überstrahlt wird, liegt G_o zwischen diesen Grenzfällen.

2.2.2 RÜCKSTREUUNG

Im nächsten Schritt soll die Rückstreuung R_o aus Gleichung (2.4) näher beschrieben werden. Die beleuchtete Fläche des Objekts wird dazu als Strahlungsquelle angesehen, die in Richtung der Empfangsapertur mit Durchmesser b_{ap} abstrahlt. Die Strahlstärke der Quelle wird in Abhängigkeit des Abstrahlwinkels ϑ zur Flächennormalen angegeben. Die Strahlcharakteristik wird dabei durch die Reflexionseigenschaften des jeweiligen Objektes bestimmt. Mit Ausnahme von spiegelnden Oberflächen und Retroreflektoren (wie beispielsweise Verkehrsschildern)

werden die Objekte im Automobilumfeld meist als Lambert-Strahler angenähert [31], der eine ideale diffuse Strahlcharakteristik aufweist. Die Strahlstärke I_ϑ eines solchen Lambert-Strahlers wird beschrieben durch

$$I_\vartheta = I_{\vartheta_0} \cos(\vartheta). \quad (2.7)$$

I_{ϑ_0} beschreibt hierbei die Strahlstärke in senkrechter Richtung zur emittierenden Fläche, die mit größerem Winkel kosinusförmig abfällt. Abbildung 2.5a zeigt die Abstrahlcharakteristik über den Abstrahlwinkel ϑ für die Abstrahlung in den Halbraum. Der Raumwinkel Ω , in den ein Lambert-Strahler abstrahlt, wird durch Integration der Lichtstärke in Gleichung (2.7) über den gesamten Halbraum ermittelt und entspricht genau $\Omega = \pi$. Die aufgespannte Fläche der zurückgestreuten Strahlung auf Höhe der Empfangsapertur wird mit dem Raumwinkel Ω berechnet durch $A_{\text{lam}} = \Omega d^2 = \pi d^2$. Die Größe der Empfangsapertur mit Fläche A_{ap} definiert den Anteil der messbaren zurückgestreuten Strahlung (Abbildung 2.5b). Für ein parallel zur Empfangsapertur stehendes Objekt fällt der Kosinusterm weg, sodass

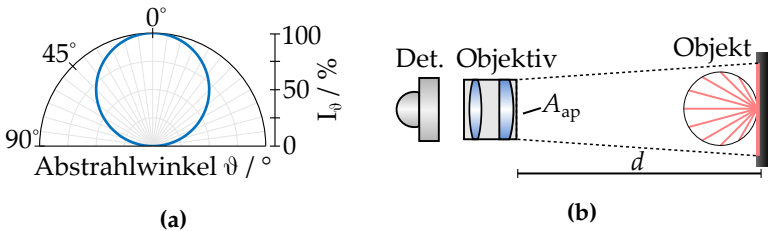


Abbildung 2.5: Abstrahlcharakteristik eines Lambert-Strahlers als Strahlstärke I_ϑ über dem Abstrahlwinkel in den Halbraum (a). Die Lambert'sche Rückstreuung streut in einen Raumwinkel $\Omega = \pi$ ab und spannt abhängig von der Distanz d eine Fläche $A_{\text{lam}} = \pi d^2$ auf. Der Verlustanteil der Leistungsbilanz wird dann durch das Verhältnis der Aperturfläche mit Durchmesser b_{ap} und der aufgespannten Fläche A_{lam} bestimmt (b).

der Rückstreuterm R_o aus der Reflektivität des Objekts R und dem Verhältnis der beiden Flächen berechnet wird mit

$$R_o = R \frac{A_{\text{ap}}}{A_{\text{lam}}} = R \frac{A_{\text{ap}}}{\pi d^2}. \quad (2.8)$$

2.2.3 ATMOSPHERISCHE ABSCHWÄCHUNG

Ein weiterer Verlustterm entsteht bei der Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung in der Atmosphäre durch Streu- und Absorptionseffekte an Partikeln in der Luft. Der Verlustterm η_{atm} wird durch die distanzabhängige, exponentielle Dämpfung des Lambert-Beer-Gesetzes beschrieben

$$\eta_{\text{atm}} = \exp(-\beta_{\text{atm}}d). \quad (2.9)$$

Die Dämpfungskonstante β_{atm} hängt hierbei stark von der Wellenlänge der verwendeten Strahlung und der Wettersituation ab und nimmt bei Nebel sehr stark zu. Eine gute Abschätzung der Dämpfungskonstante mit empirischer Datenbasis ist in [32] gegeben. Für eine Wellenlänge von 905 nm ergeben sich Werte zwischen $\beta_{\text{atm}} = 0,089 \text{ km}^{-1}$ bei klarer Sicht und $\beta_{\text{atm}} = 78,2 \text{ km}^{-1}$ bei starkem Nebel. Bei einer Messdistanz von 100 m folgt daraus eine Abschwächung um 0,89 % bzw. 99,96 %. Die Ergebnisse zeigen bereits, dass die atmosphärische Dämpfung zwar bei klaren Sichtverhältnissen vernachlässigt werden kann, bei Nebel hingegen die Empfangsleistung und damit auch die Sensorreichweite maßgeblich reduziert wird. Man beachte, dass in Gleichung (2.4) die Dämpfung aufgrund des doppelten Weges von Sende- und Empfangspfad ebenfalls doppelt eingerechnet wird.

2.2.4 VERUNREINIGUNGEN AUF LIDAR-SENSOREN

Gleichung (2.4) beschreibt die grundlegenden Einflüsse auf die Empfangsleistung in LiDAR-Sensoren. Zu diesen Einflüssen zählen sowohl feste Systemparameter als auch die Eigenschaften der Messobjekte. Durch die Anbringung der Sensoren außerhalb des geschützten Fahrzeuginnenraumes sind diese Witterungsbedingungen ausgesetzt. Dabei lagern sich Verunreinigungen wie Staubpartikel oder auch Wassertropfen auf der Oberfläche der Sensorschutzscheibe an, die die im Sensor liegenden Elemente abschirmt. Die Ablagerungen auf der Schutzscheibe definieren eine zusätzliche Störschicht, die sich auf die optischen Eigenschaften des Sensors auswirkt. Damit verbunden ist auch eine Änderung des Empfangssignals P_E in Gleichung (2.4), weshalb diese für anlagernde Verunreinigungen erweitert werden muss.

Abhängig von der Größe und dem Material der Verunreinigungen treten verschiedene optische Effekte auf (Abbildung 2.6). Sich anlagernde Staubpartikel liegen meist in der Größenordnung weniger Mikrometer [33] und damit im Bereich der Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung. Trifft Strahlung auf die Partikel, so wird diese gestreut und ändert ihre Ausbreitungsrichtung. Die Streucharakteristik an einzelnen, sphärischen Partikeln kann mit der Mie-Theorie genähert werden. Für LiDAR-Sensorik im Automobilbereich sind insbesondere Objekte in größeren Distanzen bis 300 m interessant, sodass selbst kleine Winkeländerungen einer großen absoluten Strahlablenkung entsprechen. Da der gesamte Empfangspfad nur auf die Detektion der Rückstreuung aus dem eigentlich beleuchteten Bereich ausgelegt ist, kann die durch Streuung an der Schutzscheibe induzierte Ablenkung fast ausschließlich als Verlust angesehen werden. Eine ähnliche Situation zeigt sich auf dem Rückweg der Strahlung zum Detektor, in dem diese erneut auf die Verunreinigungen trifft und wieder gestreut wird. Die Entfernungen nach der Streuung bis zum Detektor sind vergleichswei-

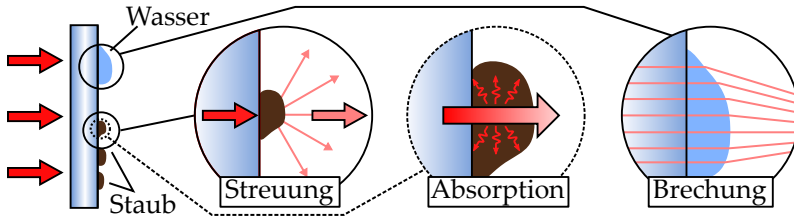


Abbildung 2.6: Extinktion der durch die Schutzscheibe propagierenden Strahlung an Verunreinigungen wie Staub oder Wassertropfen. Je nach Größe und Material der Anlagerungen treten Streuung, Absorption oder Brechung an den Partikeln bzw. Tropfen auf, die alle zu einer Reduzierung der Send- und Empfangsleistung führen.

se gering, die Winkeländerung wird aber durch das Objektiv direkt in eine Ortsverschiebung umgesetzt, sodass die kleinen Detektorpixel möglicherweise nicht getroffen werden. Auch hier wird sich somit ein Großteil der gestreuten Strahlung als Verlust auswirken. Zusätzlich können durch die verschobene Ortsabbildung bei LiDAR-Systemen mit Detektor-Arrays auch benachbarte Pixel beleuchtet werden, sodass Störsignale entstehen. In dieser Arbeit wird die Betrachtung allerdings auf die Verlustleistung beschränkt.

Neben der Streuung wird ein Anteil der Strahlung im Medium absorbiert. Das Ausmaß der Absorption hängt dabei sowohl vom Material als auch von der Dicke der Verunreinigungsschicht ab. Eine Abschätzung kann für Wasser mit einem Absorptionskoeffizienten von $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 8 \text{ m}^{-1}$ [34] bei 900 nm und 20 °C gemacht werden. Für einen Tropfen mit Radius $r = 3 \text{ mm}$ entsteht ein Verlust von 2,4 % im Zentrum. Insbesondere bei Wasser ist der Absorptionsverlust nur ein geringer Faktor im entstehenden Gesamtverlust. Bedingt durch die nahezu sphärische Tropfenform wirkt jeder einzelne Tropfen als Linse und fokussiert die Strahlenbündel in unterschiedliche Brennebenen im Raum. Analog zur Streuung entsteht somit eine Winkeländerung,

die wiederum in einem Signalverlust resultiert. Der gesamte Verlust skaliert hierbei mit der durch die Wassertropfen bedeckten Fläche und tritt ebenfalls sowohl sende- als auch empfangsseitig auf.

Der Gesamtverlust der Strahlungsleistung bei Propagation durch die Verunreinigungen auf der Schutzscheibe wird als Extinktion bezeichnet. Für die Abschätzung der Systemreichweite ist dabei die Art des Verlustes nicht relevant. Für die Leistungsbilanz von empfangener zu gesendeter Strahlung muss die Extinktion als zusätzlicher Faktor hinzugefügt werden. Die Beschreibung und auch die spätere experimentelle Untersuchung wird durch die Transmission T durch die Schutzscheibe beschrieben, in der alle Verlustanteile aus Streuung, Absorption und Brechung beinhaltet sind. Da die Transmission T direkt der Leistungsbilanz bei Durchgang durch die Schutzscheibe entspricht, kann diese einfach quadratisch in Gleichung (2.4) hinzugefügt werden, sodass diese erweitert wird zu

$$P_E = P_S \eta_{\text{sys}} G_o(d) R_o(d) \eta_{\text{atm}}^2(d) T^2. \quad (2.10)$$

Die quadratische Abhängigkeit folgt daraus, dass die Strahlung die Schutzscheibe und damit auch die Verunreinigungen doppelt (Hin- und Rückweg) durchquert. Gleichung (2.10) beinhaltet alle hier wichtigen Faktoren, die die Empfangsleistung bei konstanter Sendeleistung beeinflussen. Um die Leistungsbilanz auf die Systemreichweite zu übertragen, wird im folgenden Abschnitt noch ein zusätzlicher Schwellwert hinzugefügt, sodass insbesondere die Extinktion bzw. Transmission mit der Reichweite verknüpft werden kann.

2.2.5 LEISTUNGSBILANZ UND SENSORREICHWEITE

Die maximale Reichweite des Sensors ist grundlegend durch die Empfangsleistung in Gleichung (2.10) und die distanzabhängigen Größen

$G_o(d)$, $R_o(d)$ und $\eta_{\text{atm}}^2(d)$ bestimmt. In dieser Arbeit wird experimentell der Einfluss der Verunreinigungen auf die Reichweite untersucht. Die Distanzabhängigkeit wird deshalb auf die relevanten Größen beschränkt. Da die atmosphärische Abschwächung in Laborbedingungen (klare Sicht) erst bei sehr großen Entfernungen eine tragende Rolle spielt, kann diese für kleine Distanzen (< 100 m) vernachlässigt werden ($\eta_{\text{atm}}^2 \approx 1$). Zusätzlich werden nur hinreichend große Objekte verwendet, sodass der Querschnitt σ immer mit dem Sendestrahл vollständig überlappt ($G_o = 1$). Durch die Beschränkung auf Objekte mit Lambert'scher Streucharakteristik vereinfacht sich Gleichung (2.10) zu

$$P_E = k \frac{R}{d^2} T^2, \quad (2.11)$$

wobei der Faktor k alle konstanten Größen (Sensoreffizienz, Geometriefaktor, Umgebungsparameter) vereinigt. Gleichung (2.11) beschreibt den quadratischen Abfall des Messsignals mit steigender Objektdistanz. Die maximale Distanz d_{max} des Sensors ist durch verschiedene Rauscheinflüsse limitiert, die einen Minimalwert der Empfangsleistung erfordern. Die Definition dieses Minimalwertes erfolgt über das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Durch die Festsetzung eines minimalen SNRs wird definiert, ab wann ein Messsignal als hinreichend sicher betrachtet und somit ein Objekt erkannt wird. Auf welchen Wert das minimale SNR festgelegt wird, ist je nach Sensor unterschiedlich und wird bezüglich der gewünschten Messunsicherheit angepasst. Entfernt sich ein Objekt mit Reflektivität R immer weiter vom Sensormittelpunkt, so fällt die Empfangsleistung quadratisch ab. Die maximale Sensorreichweite ist genau dann erreicht, wenn der definierte Minimalwert des SNR unterschritten wird.

Für die SNR-Berechnung sind alle Rauschgrößen relevant, von denen viele vom verwendeten Detektor abhängen. Wie die Verunreinigungen das Rauschen beeinflussen, kann aufgrund der Komplexität der Verschmutzungsverteilung nicht abgeschätzt werden. Anhaftende

Verunreinigungen reduzieren aufgrund der verringerten Transmission beispielsweise die Hintergrundstrahlung, die den Detektor auf direktem Wege erreicht und damit auch das Hintergrundrauschen. Gleichzeitig streuen die Partikel im Empfangspfad einen Teil der Empfangsstrahlung (und der Hintergrundstrahlung) von der gesamten Schutzscheibe aus auf indirektem Wege in Richtung der verschiedenen Detektorpixel, sodass das Hintergrundrauschen erhöht wird. Welcher Anteil dominiert, hängt neben der Streucharakteristik der Partikel auch von Systemfaktoren wie der optischen Abbildung und der Detektoranordnung oder dem Ausmaß des Hintergrundlichtes ab.

Wird der Rauschanteil durch die Verunreinigungen nicht beeinflusst, dann entspricht die Definition eines minimalen SNR direkt einer minimalen Empfangsleistung. Ist dieser Minimalwert konstant, folgt aus Gleichung (2.11) dann für unterschiedliche Verunreinigungen mit variierender Transmission

$$d_{\max} \propto T, \quad (2.12)$$

also ein linearer Zusammenhang von Transmission und maximaler Sensorreichweite. Die Untersuchung dieses Zusammenhangs wird im folgenden Kapitel experimentell durchgeführt. Dazu werden definierte Verschmutzungsproben hergestellt und anhand der Proben transmission charakterisiert. Die Proben werden im Anschluss vor einen LiDAR-Sensor platziert, um mögliche Verschmutzungsszenarien nachzustellen. Je Probe wird im Anschluss die maximale Sensorreichweite bestimmt, sodass die charakteristische Transmission mit der Reichweite in Zusammenhang gebracht werden kann.

KAPITEL 3

EINFLUSS VON VERUNREINIGUNGEN AUF LIDAR-SYSTEME

Für die Verwendung von LiDAR-Sensoren im Automobil stellen Umgebungseinflüsse eine große Einschränkung dar. Die theoretische Untersuchung aus dem vorherigen Kapitel zeigt bereits, dass die maximale Systemreichweite linear mit dem Transmissionsgrad anhaftender Verunreinigungen abnimmt. Gleichzeitig stellt die exponentielle Dämpfung der Laserstrahlung bei Propagation durch Regen oder Nebel einen hohen Verlustfaktor dar. In diesem Kapitel soll der Einfluss von Verunreinigungen experimentell untersucht werden. Dabei liegt der Fokus auf der Degradation der maximalen Sensorreichweite, die einen der wichtigsten Performance-Parameter eines solchen Sensors darstellt.

Im ersten Abschnitt werden vergleichbare Arbeiten aus der Literatur kurz beschrieben. Dabei wird insbesondere zwischen den beiden Fällen aus Abbildung 1.2 unterschieden: an der Schutzscheibe anhaftende Verunreinigungen und Niederschlag. Obwohl beide Effekte in einer Degradation der Sensorreichweite resultieren, weisen diese auch einen wichtigen Unterschied auf. Während Niederschlagseffekte unumgänglich die Leistung des Sensors beschränken, können anhaftende Verunreinigungen durch Reinigungssysteme entfernt und die optimale Sensorleistung wieder erreicht werden. In dieser Arbeit werden deshalb nur Effekte durch anhaftende Verunreinigungen untersucht.

Wie diese Verunreinigungen aussehen können, wird im zweiten Abschnitt beschrieben. Dazu werden verschiedene Proben hergestellt, die reale Szenarien möglichst gut reproduzieren. Ziel dabei ist die Erzeugung homogener Probenverteilungen, die für eine quantitative Charakterisierung notwendig sind. Die Charakterisierung erfolgt experimentell durch Messung der absoluten Transmission, bei der alle zur Extinktion beitragenden Verluste betrachtet werden.

Die hergestellten Proben werden im Anschluss als variable Verschmutzung vor einen LiDAR-Sensor platziert, sodass der Einfluss untersucht werden kann. Dazu wird ein Verfahren vorgestellt, wie aus der vom Sensor bereitgestellten Punktwolke die maximale Reichweite ermittelt werden kann. Die Bestimmung der maximalen Reichweite erfolgt somit in Abhängigkeit der Transmission der Verschmutzungsproben, sodass die beiden Parameter in Relation gesetzt und mit der theoretischen Erwartung verglichen werden können.

3.1 BISHERIGE ARBEITEN UND LITERATUR

Verschiedene Wettereffekte wurden bereits ausführlich in der Literatur untersucht, die in diesem Abschnitt kurz zusammengefasst werden. Aus der Theorie wird bereits ersichtlich, dass durch die Extinktion der Strahlung bei Propagation durch Regen abhängig von der Regenrate das Empfangssignal abnimmt. In [35] wird die gemessene Intensität eines VLP-16 LiDAR-Sensors der Firma Velodyne bei unterschiedlichen Regenraten und mehreren Objekten ausgelesen. Abhängig von den Reflexionseigenschaften der Objekte sinkt die Intensität mit steigender Regenrate stark ab, bis zu einem Maximum von 75 % Verlust bei einer Regenrate von $7,2 \text{ mm h}^{-1}$. Der hohe Verlust entsteht insbesondere durch Streuung bzw. Reflexion der Strahlung in den fallenden Tropfen.

Die Streuung erfolgt dabei in alle möglichen Raumrichtungen, so dass auch Strahlungsanteile vom Tropfen zum Sensor zurückgestreut werden. Sind die Strahlungsanteile hinreichend groß, so detektiert der Sensor aus der entsprechenden Richtung ein Objekt, obwohl dort kein Hindernis vorliegt (sogenannte False-Positives). Eine qualitative Untersuchung ist in [36] gegeben, in der ein LiDAR-Sensor (Velodyne VLP-16) in einer Regen-Testkammer verwendet wird. Während bei klarer Sicht keine False-Positives sichtbar sind, entstehen viele zufallsverteilte Detektionen nach Anschalten der Regenkammer. Die Häufigkeit der False-Positives spielt dabei insbesondere im Distanzbereich unterhalb von 10 m eine Rolle und nimmt mit größeren Distanzen aufgrund der geringeren Rückstreuung ab.

Der direkte Einfluss von Regen auf die maximale Sensorreichweite wurde bereits in [37] experimentell untersucht und in [38] simulativ für Regenraten bis zu 17 mm h^{-1} verifiziert. Dabei nimmt die Reichweite mit steigender Regenrate stark ab, wobei die Dämpfung von verschiedenen Faktoren wie den Reflexionseigenschaften der Objekte oder der Definition der minimalen Empfangsleistung abhängt. Neben Regen wurden ähnliche Untersuchungen auch in Nebelkammern durchgeführt, um die durch Nebel eingeschränkte Sicht nachzustellen. In [39] wurde die maximale Reichweite verschiedener Sensoren (Velodyne HDL64 und Ibeo Lux) in Abhängigkeit der Sichtweite bestimmt, die ein Maß für die Stärke des Nebels darstellt. Bei sehr starkem Nebel (Sichtweite $\approx 10 \text{ m}$) sinkt die maximale Reichweite auf bis zu 5 m ab und nimmt mit steigender Sichtweite nahezu linear zu.

Die Reduzierung der Systemreichweite in Nebel oder Regen hängt sehr stark von der Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung ab. In [40] wird die Reduzierung der Sensorreichweite durch Regen und Nebel bei 905 nm und 1550 nm verglichen. Aufgrund der um zwei Größenordnungen höheren Absorption in Wasser bei 1550 nm weisen

Systeme mit 905 nm Wellenlänge deutlich geringere Verluste in Regen oder Nebel auf. In Nebel können Systeme bei 905 nm beispielsweise um 60 % größere Distanzen erreichen als Systeme bei 1550 nm und eignen sich somit besser bei ungünstigen Wetterbedingungen.

In den bisher aufgeführten Quellen liegt der Fokus auf der Untersuchung des Niederschlags in der Luft. Anhaftende Tropfen am Sensor oder andere angelagerte Verunreinigungen werden dabei nicht betrachtet. Erste Untersuchungen solcher Anlagerungen sind in [41] gezeigt. Unter vollständiger Bedeckung bestimmter Teilbereiche der zylindrischen Schutzscheibe dreier Sensoren (Velodyne VLP-16, Ouster OS-1, RoboSense RS-LiDAR-32) durch eine Schnee- bzw. Eisschicht werden Punktwolken im Straßenverkehr aufgenommen. In den blockierten Bereichen der Schutzscheibe wird die Strahlung vollständig abgeschirmt, sodass die damit verbundenen Bereiche im FoV keine Objektdaten aufweisen. Eine Simulation der Empfangsleistung eines LiDAR-Sensors bei anhaftenden Regentropfen wurde in [42] für Sensoren mit kleinem Sendestrahldurchmesser durchgeführt. Die anhaftenden Tropfen werden hierbei als aneinander angrenzende Halbkugeln modelliert. Alle Strahlungsanteile, die um mehr als $0,2^\circ$ abgelenkt werden, werden als Verlust gewertet. Abhängig vom Strahldurchmesser sinkt die Empfangsleistung dabei um bis zu 50 %. Die Anordnung der Tropfen stellt hier das Worst-Case-Szenario dar und entspricht keiner realistischen Tropfenverteilung. Eine realistischere Herangehensweise wird in [43] vorgestellt. Dort werden transparente Kunststoffplatten hinter dem Kühlergrill von Fahrzeugen platziert, sodass sich aufgewirbelte Staubpartikel während der Fahrt auf der Platte ansammeln. Nach Fahrten unter verschiedenen Wetterbedingungen werden die Platten bezüglich ihrer Transmission charakterisiert. Die am stärksten verunreinigte Probe bei einer Fahrt durch wechselnde Bedingungen von Regen und Sonnenschein weist eine Transmission von 65,4 % auf.

In keiner dieser Arbeiten erfolgt eine quantitative Untersuchung des Einflusses auf die Reichweite von LiDAR-Sensoren, die in diesem Kapitel vorgestellt wird. Die ermittelten Transmissionswerte in [43] geben einen guten Anhaltspunkt für den Vergleich der Transmissionswerte der in dieser Arbeit hergestellten Verschmutzungsproben. Die Herstellung und Charakterisierung dieser Proben wird im nächsten Abschnitt gezeigt, bevor die damit verbundene Reduzierung der Sensorreichweite untersucht wird.

3.2 VERSCHMUTZUNGSPROBEN UND EXTINKTION

Zur Bestimmung der Degradation der Sensorreichweite durch anhaftende Verunreinigungen werden Verschmutzungsproben hergestellt, die vor den Sensor platziert werden, um damit möglichst reale Szenarien zu reproduzieren. Im ersten Teil dieses Kapitels wird der Herstellungsprozess der unterschiedlichen Proben skizziert. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die Homogenität der Probenverteilung, die zur quantitativen Untersuchung notwendig ist. Die Charakterisierung der Proben erfolgt durch Messung der Transmission, die ein Maß für die Durchlässigkeit der Scheibe unter Berücksichtigung aller Verlusteffekte (Extinktion) darstellt. Mit dem vorgestellten Messsystem werden die hergestellten Proben durch Mittelung über die Probenoberfläche hinweg durch einen einzelnen Transmissionswert beschrieben.

3.2.1 VERSCHMUTZUNGSPROBEN

In diesem Kapitel wird die Herstellung der verschiedenen Verschmutzungsproben in Form von festen Verunreinigungen vorgestellt. Die

Tabelle 3.1: Verwendete Medien und Verfahren für die Erstellung der Verschmutzungs- und Steinschlag-Proben.

Probe	Beschreibung	Herstellungsverfahren
Staub	Arizona-Staub gem. SAE J726 fein [44]	zyklisches Aufsprühen (3 %-Lösung)
Salz	Natriumchlorid	zyklisches Aufsprühen (5 %-Lösung)
Pollen	Handelsübliche Blütenpollen, Inhaltsstoffe unbekannt	zyklisches Aufsprühen (1,3 %-Lösung)
Steinschlag	Nachstellung vieler einzelner Steinschläge, homogen verteilt über die Plattenoberfläche	Beschuss durch Hartgussgranulat, Größe ca. 3 mm – 5 mm

Ergänzung von Wasser erfolgt erst in Abschnitt 3.3.4, da die Proben nicht beständig sind und folglich nicht für Transmissionsmessungen verwendet und gleichzeitig als Verschmutzung vor dem Sensor platziert werden können. Als Probensubstrat werden 15 cm × 10 cm große, transparente Polycarbonat (PC)-Platten mit einer Dicke von 3 mm verwendet. Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Probenmedien. Neben Wasser sind die häufigsten Verunreinigungen durch Straßenstaub, Salz und Pollen gegeben, die durch Aufsprühen einer Lösung von Wasser mit der jeweiligen Probe aufgetragen werden. Der Straßenstaub wird hier durch sogenannten Arizona-Staub nachgestellt, der nach der SAE-Norm J726 [44] als Prüfmedium im Automobilbereich verwendet wird. Neben den Verschmutzungsproben werden zwei Steinschlag-Proben durch Beschuss der Platten mit Hartgussgranulat hergestellt. Diese stellen zwar keine Verschmutzung dar, sorgen aber gleichermaßen für eine Degradation der Sensorreichweite und werden deshalb zusätzlich untersucht.

Im Experiment wird die Probe vor den Sensor platziert. Dabei ist nicht exakt bekannt, welchen Bereich der Probe die Strahlung durchleuchtet. Um den Effekt auszugleichen, werden möglichst homogene Probenverteilungen benötigt, sodass der Einfluss der Positionierung minimiert wird. Zur Erstellung der verschiedenen Staub-, Salz- und Pollenproben ist deshalb ein zyklischer Sprühgang notwendig, der in Abbildung 3.1 skizziert ist. Die Probenmischung in Wasser wird mit einer Sprühflasche waagrecht über die Platte gesprüht, sodass nur kleine Tropfen auf die Platte fallen. Der Sprühvorgang wird nach einer kurzen Zeitspanne (2-5 s) gestoppt, damit sich keine großen Tropfenansammlungen bilden. Dabei entsteht eine homogene Tropfenverteilung, die für eine ebenfalls homogene Verteilung der Verschmutzung notwendig ist. Im nächsten Schritt wird die Probe im Ofen bei einer Temperatur von 60 °C getrocknet, sodass nur die Schmutzpartikel auf der Platte haften bleiben. Um verschiedene Verschmutzungsgrade zu realisieren, wird der Vorgang zyklisch wiederholt, sodass schichtweise immer stärker verschmutzte Proben entstehen, ohne dabei die Homogenität der Verteilung zu beeinträchtigen. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft eine

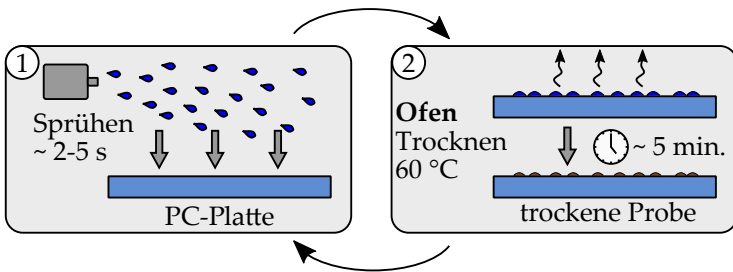


Abbildung 3.1: Zyklische Erstellung der Staub-, Salz- und Pollenproben durch aufeinanderfolgendes Sprühen einer Lösung der Probe in Wasser und anschließendem Trocknungsvorgang, um der Bildung großer Tropfenansammlungen entgegenzuwirken.

Staubprobe (oben) mit den Dimensionen der Platte von 15 cm × 10 cm mit schwarzem Hintergrund. Nach Austrocknen des Wassers bleiben ausschließlich die Staubrückstände übrig. Diese verteilen sich in einzelnen, kleinen Partikelanlagerungen über die gesamte Plattenoberfläche hinweg. In der unteren Bildreihe sind Ausschnitte mit ca. 1 cm Breite vergrößert für Staub, Salz, Pollen sowie einer Steinschlag-Probe gegeben. In allen gezeigten Fällen sind homogene Verteilungen der Verschmutzung zu erkennen. Insgesamt wurden 15 Proben für die weiteren Untersuchungen der Reichweite erstellt, die dazugehörigen Bilder sind im Anhang A.1 aufgeführt.

Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, wie die Transmission der Proben experimentell bestimmt werden kann. Die Werte werden dabei über die Oberfläche der Platte hinweg gemittelt. Die Mittelung liefert ne-

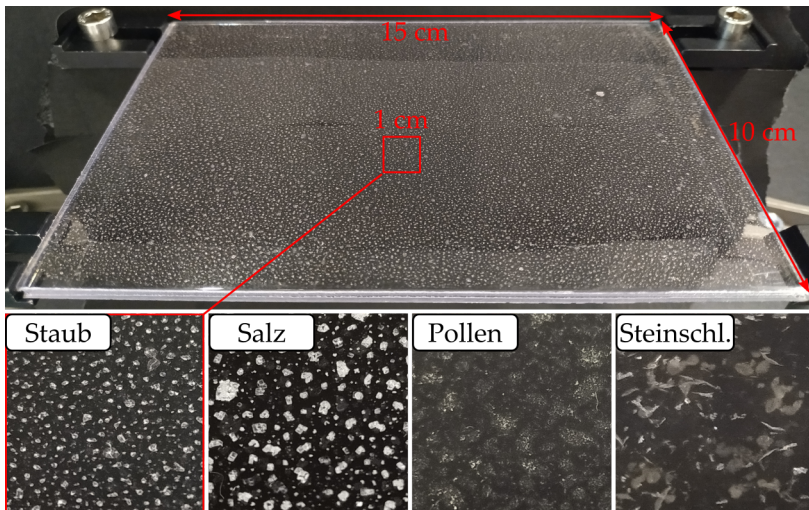


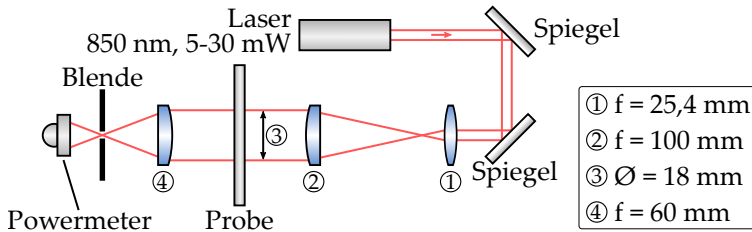
Abbildung 3.2: Beispiel einer Staubprobe (oben). Die Staubpartikel lagern sich homogen über die Plattenoberfläche verteilt in Clustern an. Unten ist für alle Probenarten jeweils beispielhaft ein Ausschnitt mit ca. 1 cm Breite gezeigt.

ben der Plattentransmission selbst mit der Standardabweichung ein Maß für die Homogenität der Probe, die somit ebenfalls experimentell überprüft werden kann.

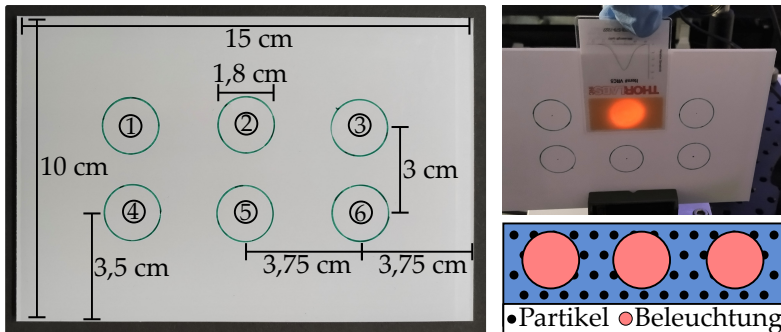
3.2.2 CHARAKTERISIERUNG DER PROBEN

Für die Nutzung der hergestellten Proben als definierte Verschmutzungsgrade wird die Transmission der Probe als charakteristische Verlustgröße herangezogen. Zur Messung wird der in Abbildung 3.3a gezeigte Aufbau genutzt. Als Strahlungsquelle wird ein cw-Laser (LASER COMPONENTS FP-D-850-30-C-F, 30 mW) mit einer Wellenlänge von 850 nm verwendet, da die Laserdioden im später untersuchten LiDAR-Sensor ebenfalls Strahlung bei 850 nm aussenden. Über ein Teleskop aus zwei Linsen (bikonvex und plan-konvex) mit Brennweiten von $f_1 = 25,4$ mm und $f_2 = 100$ mm wird der Sendestrahl um den Faktor $V = 3,94$ auf einen Durchmesser von ca. 18 mm vergrößert. Der große Strahldurchmesser wird benötigt, damit die Transmissionsmessung über einen größeren Teilbereich gemittelt wird. Dies ist notwendig, da die Partikel sich in Clustern auf der Platte ansammeln, die in der Größenordnung des ursprünglichen Strahldurchmessers liegen können (siehe Abbildung 3.3b unten rechts).

Die zu messende Probe wird in den kollimierten Strahl platziert. An der Probe treten die verschiedenen Verlusteffekte wie Absorption, Reflexion und Streuung auf. Die Streuung erfolgt hierbei, abhängig von der Größenverteilung der Verschmutzungspartikel, in unterschiedliche Raumrichtungen. In LiDAR-Systemen legt die Strahlung nach der Streuung an der Schutzscheibe noch große Entfernungen ($\gg 1$ m) zurück, sodass selbst kleine Winkeländerungen einen großen Versatz erzeugen und somit als Verlust wirken. Durch die endliche Dimension des Detektors im Transmissionsmessaufbau können diese Win-



(a)



(b)

Abbildung 3.3: Transmissionsaufbau bei $\lambda = 850 \text{ nm}$. Durch Vergrößerung des Strahldurchmessers auf ca. 18 mm wird die Transmission lokal über mehrere Anlagerungen von Schmutzpartikeln gemittelt. Die Messung erfolgt an sechs definierten Positionen auf der PC-Platte.

kelanteile aber den Detektor treffen, sodass die Transmissionswerte verfälscht werden. Deshalb wird hinter der Probe eine weitere Linse ($f_3 = 60 \text{ mm}$) platziert, die den kollimierten Anteil in die Fokusebene abbildet. Der Fokuspunkt für den gestreuten Anteil (nicht parallel) ist in der Fokusebene versetzt, sodass das Streulicht mit einer Irisblende geblockt wird. Der restliche Strahlungsanteil hinter der Blende wird mit einem Leistungsmesskopf (Thorlabs LC120C) gemessen.

Zur Bestimmung der Transmission wird zunächst die Referenzleistung P_{Ref} bestimmt, indem die Probe aus dem System entfernt wird. Wird die Probe anschließend in den Strahlengang platziert, sinkt die ankommende Leistung auf P_{Probe} , sodass die Transmission aus dem Verhältnis

$$T = \frac{P_{\text{Probe}}}{P_{\text{Ref}}} \quad (3.1)$$

bestimmt wird. Da in den folgenden Experimenten nicht exakt bekannt ist, welchen Bereich der Platte die vom LiDAR ausgesendete Strahlung durchquert, werden die Transmissionswerte über die Plattenoberfläche hinweg gemittelt. Die Messung erfolgt dazu an sechs verschiedenen, fest definierten Positionen, die in Abbildung 3.3b auf der weißen Schutzfolie der Platte eingezeichnet sind. Die gemessene Transmission liefert somit einen einzelnen Wert, mit dem die Platte beschrieben werden kann. Man beachte, dass die Verschmutzung keine vollständig homogene Schicht darstellt und die Transmission lokal auf der Platte stark variieren kann. Um größere Strahlungsleistungen bei gleichzeitiger Begrenzung durch die Augensicherheit aussenden zu können, wird die Strahlung in LiDAR-Sensoren in der Regel ebenfalls auf größere Durchmesser aufgeweitet, sodass die hier verfolgte Mittelung sinnvoll angewendet werden kann.

Für jede der 14 hergestellten Proben und einer Referenzprobe (saubere Platte) wird die Transmission an den sechs gezeigten Positionen bestimmt. Die Transmissionswerte (Mittelwerte) sind in Abbildung 3.4 unterteilt nach Probenmedium mit fallender Transmission (bzw. steigendem Verschmutzungsgrad) dargestellt. Die Fehlerbalken entsprechen hier der ermittelten Standardabweichung. Alle zugehörigen Messwerte und Probenbezeichnungen sind in Tabelle A.1 im Anhang zu finden. Während die saubere Platte einen Transmissionswert von ca. 90 % aufweist, erreichen die Proben mit festen Verunreinigungen (Staub, Salz und Pollen) verschiedene Werte zwischen 45 % und

85 %. Die beiden Steinschlag-Proben zeigen Werte zwischen 75 % und 90 %. Die Standardabweichung aus den Mittelungen kann als ein Maß für die Homogenität der Proben betrachtet werden. Die Standardabweichungen der Verschmutzungsproben liegen meist unterhalb 1 % mit geringeren Ausreißern bis maximal 2,2 % für die am stärksten verschmutzte Pollen-Probe. Im Falle der Steinschlag-Proben liegt die Standardabweichung der Probe mit geringerer Transmission bei 3,9 %, da der Herstellungsprozess im Vergleich zur zyklischen Herstellung der Verschmutzungsproben weniger kontrolliert werden konnte.

Die hergestellten Proben decken viele mögliche Fälle zwischen geringen, häufig auftretenden Verschmutzungsgraden (z.B. Partikelansammlungen während der Fahrt) und sehr starken, selten auftretenden Verschmutzungsgraden (z.B. bei längerem Stillstand des Fahrzeugs) ab. Während hier die Verschmutzung homogen über die gesamte Platte verteilt ist, treten in der Realität häufig auch nur lokale Ansammlungen

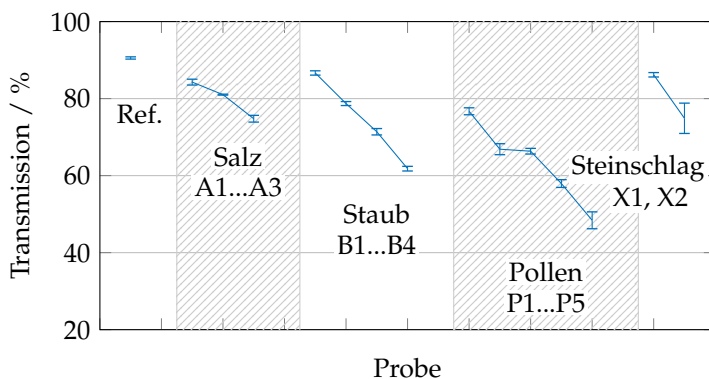


Abbildung 3.4: Transmissionswerte der hergestellten Verschmutzungsproben bei 850 nm mit der Standardabweichung der sechs gemittelten Werte als Fehlerbalken, aufgeteilt nach jeweiligem Probentyp mit Angabe der Probenbezeichnungen.

von Verschmutzungen auf, die möglicherweise nur einen Teilbereich des gesamten FoVs einschränken. Die im nächsten Kapitel folgenden Ergebnisse sind hier auf die Verschmutzung der gesamten Schutzscheibe und somit des gesamten FoVs ausgelegt, da nur so quantitative Untersuchungen möglich sind. Diese quantitativen Ergebnisse sind allerdings auf jeden verschmutzten Teilbereich übertragbar, der jeweils durch den lokalen Transmissionswert beschrieben werden kann.

3.3 DEGRADATION DER SENSORREICHWEITE

In diesem Kapitel wird der Einfluss von Verschmutzung auf die Reichweite von LiDAR-Sensoren experimentell untersucht. Obwohl in der Realität die Verunreinigungen an der Schutzscheibe selbst anhaften, wird in dieser Arbeit die Verschmutzung durch die hergestellten Verschmutzungsproben nachgestellt. Die Platten werden unmittelbar vor die Schutzscheibe platziert, sodass diese selbst nicht verschmutzt wird. Diese Herangehensweise ist notwendig, da die Verschmutzung auf der Schutzscheibe selbst keiner Transmissionsmessung zugänglich ist und somit keine quantitative Untersuchung erfolgen kann. Zusätzlich verkratzt die Schutzscheibe möglicherweise durch aufeinanderfolgende Reinigungsvorgänge, sodass eine dadurch induzierte Degradation der Reichweite mit den eigentlichen zu untersuchenden Effekten überlagert. Die Verwendung von Verschmutzungsplatten ist somit sinnvoll und erlaubt es, die gemessene Transmission der Verschmutzung direkt mit der Sensorreichweite zu verknüpfen. In den folgenden Abschnitten werden der Messaufbau mit dem genutzten LiDAR-Sensor, die Aufnahme und Auswertung der 3D-Punktwolken sowie die daraus abgeleiteten Ergebnisse diskutiert.

3.3.1 AUFBAU UND MESSPRINZIP

Zur experimentellen Bestimmung der Sensorreichweite von LiDAR-Sensoren wird ein Testlabor mit hinreichend großen Dimensionen benötigt, um die generell hohen Distanzen und insbesondere auch die maximale Distanz messen zu können. In dieser Arbeit wird ein LiDAR-Sensor (Ouster OS-1) verwendet, der in einem Labor mit einer Länge von 25 m betrieben wird. Nach Herstellerangaben erreicht der Sensor eine maximale Reichweite von 60 m (bei Objekten mit 10 % Reflektivität und 50 % Detektionswahrscheinlichkeit [45]). Da somit die erreichbaren Distanzen oberhalb der möglichen Distanzen im Labor liegen, muss der Messbereich des Sensors durch die Verwendung eines Neutraldichtefilters (ND-Filter) mit einer optischen Dichte von ND 0,2 bzw. einer Transmission von 63,2 % verringert werden. Der Filter reduziert, genau wie die Verschmutzungsplatten, die Send- und Empfangsleistung des Lichtsignals und wird vor die Verschmutzungsplatte platziert. Die Anordnung der Komponenten im Labor ist in Abbildung 3.5 (ohne den ND-Filter) gezeigt. Die Verschmutzungsprobe (Umrandung rot gestrichelt) wird direkt hinter den Sensor (im Bild Velodyne VLP-16, für die gezeigten Messungen Ouster OS-1) so platziert, dass das vertikale Sichtfeld des Sensors durch die Platte abgedeckt ist. Das horizontale FoV von 360° ist nur in einem begrenzten Bereich durch die Verunreinigungen beeinflusst. Dieser Teil definiert den hier verwendeten Nutzbereich. Alle weitere Teile des FoVs werden nicht näher betrachtet, da die Ergebnisse auf jeden Bereich übertragbar sind. Die Ausrichtung des Objekts (blau gestrichelt, im folgenden als Target bezeichnet) erfolgt linear entlang einer Achse, sodass es bei jeder Distanz d_t im verschmutzten FoV liegt. Als Target wird eine $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$ große Streuscheibe mit Lambertscher Streucharakteristik und einer Reflektivität von $R = 10\%$ verwendet, die auf der Verschiebestrecke in einem Distanzbereich von 2,5 m bis 22,5 m in Schritten

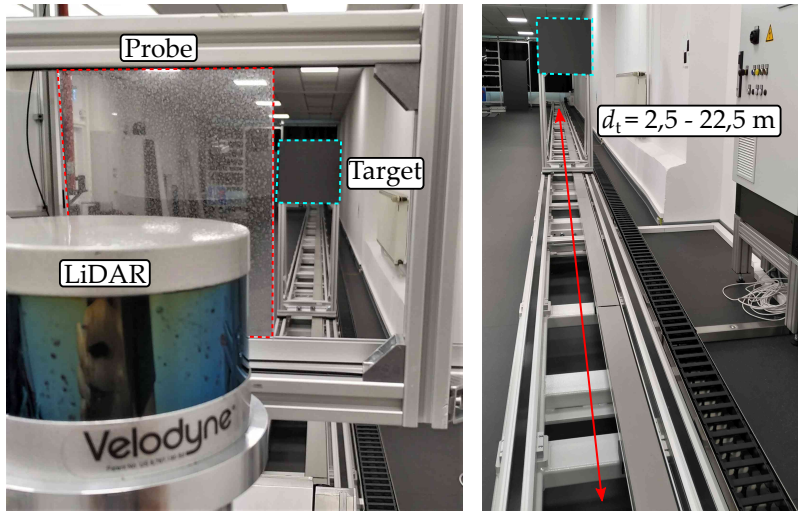


Abbildung 3.5: Messaufbau im Labor. Vor den Sensor (hier VLP-16) wird die Verschmutzungsprobe (rot gestrichelt) gestellt, sodass das bewegliche Target (blau gestrichelt) im durch die Verschmutzung beeinflussten FoV des Sensors liegt. Das Target wird entlang der Messstrecke in 0,5 m Schritten von $d_t = 2,5$ m bis $d_t = 22,5$ m bewegt. An jeder Position werden 37 Punktwolken in 4 s aufgenommen.

von 0,5 m verfahren wird. An jeder Position wird für eine Zeitspanne von 4 s die Punktwolke gespeichert.

Abbildung 3.6 zeigt beispielhaft eine Punktwolke im Messlabor, die mit einem Ouster OS-1 LiDAR aufgenommen wurde. Die eingezeichnete Gitterebene liegt parallel zur Sensorgrundfläche mit markierten Gitterabständen von 1 m. Der Sensorursprung ist mit einem weißen Kreuz markiert. Die Farbskala stellt einen Intensitätswert der gemessenen Reflexionen dar, der auf die Messdaten normiert wird. In der schrägen Aufsicht (links) sind sowohl Wände als auch Decke und Boden des Raumes erkennbar. Die Intensitätswerte im Bodenbereich sind

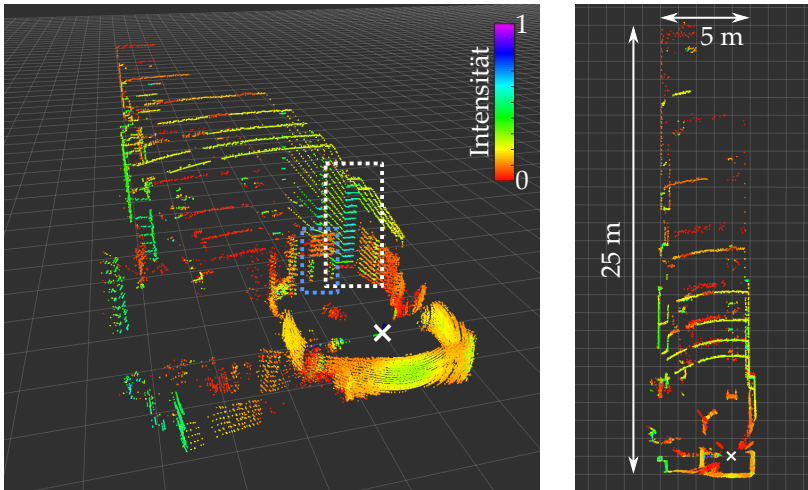


Abbildung 3.6: Punktwolke eines Ouster OS-1 LiDAR-Sensors. Das weiße Kreuz markiert den Sensormittelpunkt. Erkennbar sind die 16 Messebenen (weiß gestrichelt) und in der Draufsicht rechts die Raumdimensionen bei einer Schrittweite des Gitters von 1 m.

hier wesentlich geringer aufgrund der geringeren Reflektivität des dunklen Bodenbelages im Vergleich zu den hellen Wänden (vergleiche Abbildung 3.5). Besonders im Nahbereich oder an den Wänden (weiß gestrichelt) sind die 16 Messebenen des Sensors erkennbar, die durch 16 Sende- und Empfangselemente erzeugt werden und ein vertikales FoV von $33,2^\circ$ aufspannen. In der Draufsicht (rechts) können die Dimensionen des Raumes mit $25\text{ m} \times 5\text{ m}$ ausgelesen werden. Ebenfalls erkennbar (links, blau gestrichelt) ist das verwendete Target, dessen Information im nächsten Abschnitt selektiert wird. Dazu werden an jeder der 41 Targetpositionen jeweils 37 Punktwolken aufgenommen, die bei einer Rotationsfrequenz von 10 Hz erzeugt werden. Der Vorgang wird für jede der 14 hergestellten Proben sowie der Referenzprobe wiederholt, sodass insgesamt ca. 23000 Punktwolken gespeichert

werden. Zur Verringerung von Rauscheinflüssen wird der Raum vor Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Hintergrundeinflüsse mit einer Beleuchtungsstärke von 65 lx in Sensorrichtung während der gesamten Versuchsdurchführung minimiert werden.

3.3.2 DATENAUSWERTUNG

Das Auswerteverfahren der gemessenen Punktwolken wird in diesem Abschnitt anhand einer einzelnen Verschmutzungsprobe (Staub B4, $T_{850} = 61,8\%$) vorgestellt. Aufgrund der großen Datenmenge wird die Auswertung für die weiteren Proben nicht dargestellt, erfolgt aber analog. Das Ziel ist, für die vollständige Messreihe mit einer Verschmutzungsprobe die maximale Sensorreichweite zu bestimmen. Die Definition der Sensorreichweite wird hier über die Detektionswahrscheinlichkeit erfolgen. Um diese zu ermitteln, werden die auftretenden Detektionen gezählt und mit einem Erwartungswert verglichen.

Aus jeder Punktwolke wird zunächst das Target von der restlichen Information des Raumes getrennt, sodass die Untersuchung ausschließlich auf die Messung des Objektbereichs mit bekannter Reflektivität erfolgt. Dazu wird die Entstehung der Punktwolke anhand Abbildung 3.7 genauer betrachtet. In Abbildung 3.7a wird die vertikale Ausbreitung der 16 Sensorebenen skizziert, die unter verschiedenen Winkeln θ_i den Raum aufspannen. Durch die unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen und den variierenden Abstand des Targets zum Sensor verringert sich mit größerer Distanz die Anzahl an Sensorebenen, die das Target treffen. Nach Herstellerangaben sind die 16 Sensorebenen in einem vertikalen FoV von $33,2^\circ$ gleichverteilt [45], sodass benachbarte Ebenen um mehr als 2° voneinander getrennt sind. Bei einem Abstand von 20 m liegen die Ebenen dann bereits um 70 cm auseinander, sodass nur eine einzelne Ebene das Target treffen kann.

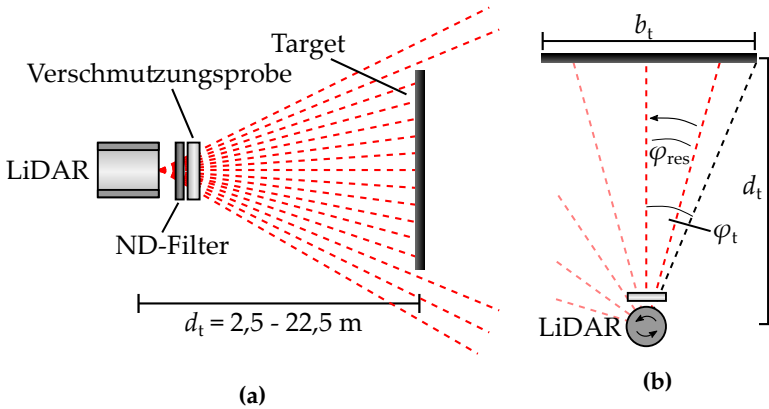


Abbildung 3.7: Vertikale (a) und horizontale (b) Auflösung des Sensors (Ouster OS-1) mit 16 Ebenen und $\varphi_{\text{res}} = 0,1758^\circ$. Durch die Berechnung des Öffnungswinkels φ_t vom Sensor zum Target kann der Nutzbereich aus der Punktelwolke zugeschnitten werden.

Die Auswertung erfolgt deshalb bei allen Abständen nur für die Ebene, die sich parallel zur Grundfläche des Raumes ausbreitet und somit immer auf das Target trifft. Damit wird gleichzeitig sichergestellt, dass nur ein einzelnes Sender-Emitter-Paar genutzt wird und somit keine Unterschiede durch die verschiedenen Laserdioden oder Detektoren das Messergebnis beeinflussen.

Die horizontale Auflösung des Sensors ist mit der Rotationsgeschwindigkeit verknüpft und beträgt hier $\varphi_{\text{res}} = 0,1758^\circ$. Abbildung 3.7b skizziert die Rotation in einer Ebene, in der durch den Winkel φ_{res} versetzt ToF-Messungen durchgeführt werden. Der Sensor spannt zum Target den Winkel φ_t auf, der mit der Distanz d_t und der Breite des Targets $b_t = 0,5 \text{ m}$ berechnet wird gemäß $\varphi_t = \tan^{-1} \left(\frac{b_t}{2d_t} \right)$.

Aus allen gemessenen Punktelwolken kann durch Isolierung der einzelnen Detektorebene in 0° Richtung (vertikal) und gleichzeitigem

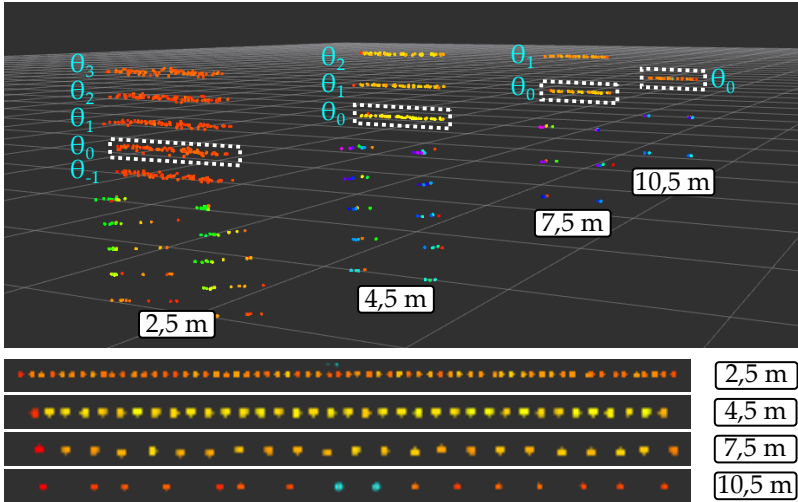


Abbildung 3.8: Ausschnitt des Targets inklusive der Halterung aus verschiedenen Punktwolken bei den Objektdistanzen 2,5 m, 4,5 m, 7,5 m und 10,5 m. Durch die vertikale Ausbreitung der verschiedenen Sensorebenen reduziert sich die Anzahl an Ebenen, die das Target treffen bis hin zu einer einzelnen Ebene. Durch Isolierung dieser einzelnen Ebene wird die Anzahl an Detektionen gezählt und mit der zu erwarteten maximalen Anzahl verglichen.

Ausschneiden des horizontalen Winkelbereiches φ_t das Target von dem restlichen Raumbereich getrennt werden. Zur besseren Darstellung zeigt Abbildung 3.8 den horizontalen Ausschnitt aus vier getrennten Messungen bei den Distanzen 2,5 m, 4,5 m, 7,5 m und 10,5 m, in dem jeweils die Streuscheibe selbst sowie die Halterung sichtbar sind. Während bei $d_t = 2,5\text{ m}$ noch 5 Sensorebenen mit vertikalen Ausbreitungsrichtungen $\theta_{-1} - \theta_3$ das Target treffen, reduziert sich die Anzahl bis nur noch eine Ebene sichtbar ist ($d_t = 10,5\text{ m}$). Die weiße Umrandung zeigt jeweils die 0° -Ebene, die bei jeder Distanz sichtbar bleibt. Im unteren Bereich der Abbildung sind die jeweiligen Ausschnitte vergrößert dargestellt. Die Farbwerte (Intensität) werden

je Ausschnitt neu skaliert und sind deshalb nur innerhalb eines Ausschnittes vergleichbar. Da sich der Öffnungswinkel φ_t mit steigender Distanz verringert, wird die Anzahl an möglichen bzw. maximalen Detektionen N_{\max} geringer. Diese lässt sich durch den Quotienten des vollen Öffnungswinkels $2\varphi_t$ zur horizontalen Winkelauflösung berechnen nach

$$N_{\max} = \left\lceil \frac{2\varphi_t}{\varphi_{\text{res}}} \right\rceil = \left\lceil \frac{2 \tan^{-1} \left(\frac{b_t}{2d_t} \right)}{\varphi_{\text{res}}} \right\rceil. \quad (3.2)$$

Hierbei muss beachtet werden, dass die Laserstrahlen aufgrund des großen Strahldurchmessers (1 cm mit 0,13° Divergenz [45]) im Randbereich nur teilweise auf das Target treffen können. Der Teilreflex kann bereits ausreichen und detektiert werden. Der berechnete Quotient wird deshalb immer aufgerundet, um die Randtreffer zu berücksichtigen. Die Ausschnitte in Abbildung 3.8 bei 4,5 m und 7,5 m zeigen im Randbereich genau diesen Effekt, der an der geringeren Intensität (orange/rote Farbe) der Randpunkte erkennbar ist.

Die fallende Anzahl an Detektionen mit steigendem Abstand ist bereits in den Punktwolken sichtbar. Im unteren Ausschnitt (10,5 m) ist erkennbar, dass die Punkte lückenhaft verteilt sind, da nicht an jeder möglichen Position ein Reflex detektiert wird. Abbildung 3.9 zeigt die aus den Ausschnitten ermittelte Anzahl an Detektionen N_{exp} im Vergleich zur maximalen Anzahl N_{\max} für den gesamten Distanzbereich von 2,5 m bis 22,5 m. Durch die Aufrundung des Quotienten in Gleichung (3.2) entsteht ein stufenförmiger Verlauf, der beginnend bei $N_{\max} = 65$ bei $d_t = 2,5$ m auf $N_{\max} = 8$ bei $d_t = 22,5$ m abfällt. Bei Betrachtung der ermittelten Anzahl an Detektionen N_{exp} fällt auf, dass die ersten beiden Messdistanzen nur wenige Detektionen aufweisen, obwohl die zurückgestreute Leistung dort am höchsten ist. Der Sensor hat somit eine Mindestreichweite, die durch die Blendung des Sensors im Nahbereich entsteht und hier nicht weiter betrachtet wird.

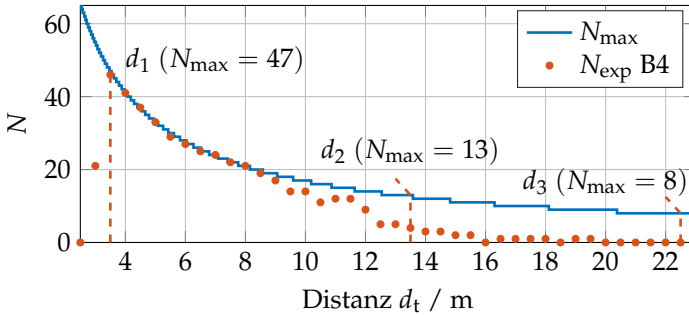


Abbildung 3.9: Maximale Anzahl an Detektionen N_{\max} und experimentell ermittelte Anzahl an Detektionen N_{\exp} am Beispiel einer Einzelmessung der Probe B4. Durch Aufrunden der Berechnung in Gleichung (3.2) entsteht ein stufenförmiger, fallender Verlauf der Maximalwerte. Im Bereich kurzer Distanzen bis ca. 8 m stimmen N_{\max} und N_{\exp} überein. Bei größeren Distanzen bricht N_{\exp} ein, bis das Objekt nicht mehr erkannt wird.

Stattdessen wird die Auswertung auf Distanzen $d_t \geq 3,5$ m festgelegt. Bis $d_t = 8$ m entspricht die ermittelte Anzahl genau der maximalen erreichbaren Anzahl und bricht dann bis hin zu 0 Detektionen bei $d_t = 16$ m ein, obwohl maximal weiterhin 8 Detektionen möglich sind. Der Sensor erreicht in diesem Bereich die maximale Reichweite, für die eine feste Definition notwendig ist. Auffallend ist, dass die fallende Flanke insbesondere im Bereich $d_t = 10$ m bis $d_t = 12$ m vom erwarteten Verlauf abweicht. Die Abweichung ist auf statistische Schwankungen des Messsignals, des Rauschens und des Detektors selbst zurückzuführen. Um den dadurch entstehenden Fehler in der Bestimmung der maximalen Reichweite zu reduzieren, werden an jeder Position 37 Messungen durchgeführt, von denen nur eine Einzelmessung in Abbildung 3.9 dargestellt ist.

An jeder Objektposition wird die Anzahl an Detektionen für alle 15 Proben je 37 mal gezählt. Bedingt durch die fest definierten oberen

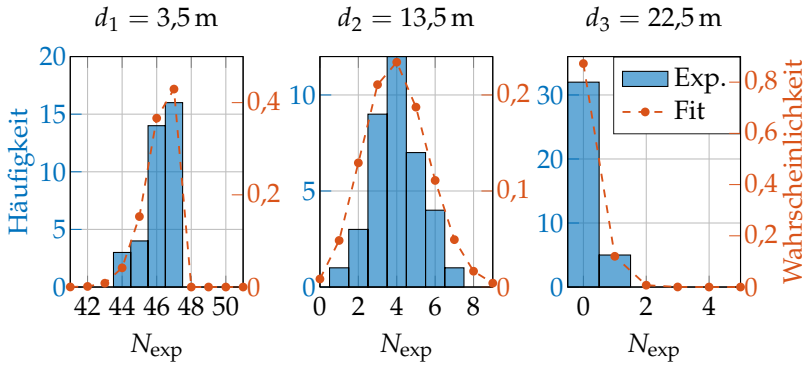


Abbildung 3.10: Histogramme über die in 37 Versuchen ermittelte Anzahl an Detektionen N_{exp} (blau) bei drei beispielhaften Distanzen. Bedingt durch die festen Ober- bzw. Untergrenzen wird eine Binomialverteilung der Auswertung zugrunde gelegt. Die roten Punkte zeigen den jeweiligen Fit der Wahrscheinlichkeitsverteilung über die experimentellen Werte, aus der jeweils die Detektionswahrscheinlichkeit abgeleitet wird.

Grenzen (N_{max}) bzw. die untere Grenze ($N = 0$) entspricht die Werteverteilung keiner Normalverteilung um den Mittelwert. Da das Zählen der Detektionen diskret erfolgt, das Maximum ebenfalls diskret ist und die Entstehung der Detektion einem Zufallsexperiment mit zwei festen Werten (Detektion / keine Detektion) entspricht, wird eine Binomialverteilung der statistischen Auswertung zugrunde gelegt. Abbildung 3.10 zeigt die Häufigkeitsverteilung der 37 mal gezählten Werte an drei festen Objektpositionen für die Probe B4 (blaue Balken). Die beispielhaften Distanzen zeigen hier jeweils die Häufigkeitsverteilung in den Randbereichen, in denen fast jede mögliche Position detektiert wird ($d_1 = 3,5 \text{ m}$) bzw. das Target kaum noch erkannt wird ($d_3 = 22,5 \text{ m}$), sowie im mittleren Bereich (hier bei $d_2 = 13,5 \text{ m}$). In den Randbereichen ist bereits erkennbar, dass die Verteilung keiner Gaußverteilung entspricht. Für jede Häufigkeitsverteilung (an jeder

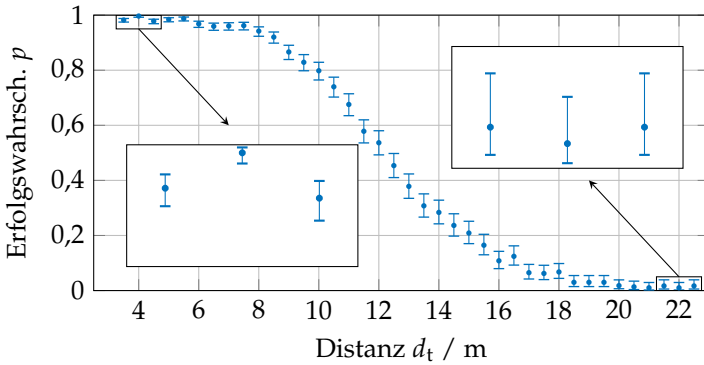


Abbildung 3.11: Erfolgs- und Fehlerwahrscheinlichkeit p aus den Fits der Binomialverteilungen für die Probe B4. Als Fehlerbalken sind die 95 % Konfidenzintervalle angegeben. Während diese für mittlere Distanzen gleichverteilt sind, sind die Verteilungen im Randbereich deutlich zum Maximum (1) bzw. Minimum (0) hin verschoben.

Position) wird eine Binomialverteilung angefitet, um aus dieser die Erwartungswerte (Anzahl an Detektionen) sowie die Erfolgs- und Fehlerwahrscheinlichkeit zu ermitteln, die im weiteren Verlauf als Detektions- und Fehlerwahrscheinlichkeit interpretiert wird. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Fits ist jeweils in rot an die Histogramme skaliert dargestellt. Zur besseren Sichtbarkeit wurden die diskreten Werte gestrichelt miteinander verbunden. Hierbei bestätigt sich, dass die Binomialverteilung sowohl für den Randbereich als auch den nahezu normalverteilten Bereich bei mittleren Distanzen als Wahrscheinlichkeitsverteilung herangezogen werden kann.

Die Fits der Binomialverteilungen liefern direkt die Erfolgs- und Fehlerwahrscheinlichkeit. Diese sind für die Probe B4 in Abbildung 3.11 über den gesamten Distanzbereich dargestellt. Man beachte, dass jeder Punkt in der Kurve aus einer einzelnen Binomialverteilung folgt. Die Fehlerbalken entsprechen den Konfidenzintervallen der Fitfunktion, in denen

95 % der ermittelten Werte liegen. Die Grenzbereiche sind jeweils vergrößert dargestellt und zeigen die unterschiedlichen Fehlerbalken an den Distanzen, an denen die Häufigkeiten nicht symmetrisch um den Mittelwert verteilt sind. Der Verlauf der distanzabhängigen Erfolgswahrscheinlichkeiten ähnelt einer Verteilungsfunktion. Während bei geringen Distanzen das Objekt immer erkannt wird, fällt die Erfolgswahrscheinlichkeit mit steigender Distanz aufgrund der sinkenden Empfangsleistung stetig ab und nähert sich immer weiter der Null an. Die maximale Sensorreichweite ist mit einer festgelegten Detektionsschwelle verknüpft, ab der das Objekt als sicher erkannt interpretiert wird. In dieser Arbeit wird die Detektionsschwelle für $p_{\min}^{0,5} = 50\%$ und $p_{\min}^{0,95} = 95\%$ untersucht.

Um die Detektionsschwelle aus den Erfolgswahrscheinlichkeiten auslesen zu können, wird eine Fitfunktion für den Verlauf in Abbildung 3.11 benötigt. Zur besseren Interpretation des Zusammenhangs zwischen der Detektionswahrscheinlichkeit und der Messdistanz zeigt Abbildung 3.12a beispielhaft für zwei Distanzen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Messsignale bzw. des Rauschsignals. Die Form dieser Verteilungen hängt von den Systemspezifikationen des Sensors ab und beinhaltet zum Beispiel statistische Schwankungen des Detektors. Bei geringen Distanzen (d_1) liegt das Messsignal so weit oberhalb des Rauschsignals, dass die Wahrscheinlichkeit einer positiven Detektion nahezu 100 % beträgt. Die Verteilungsfunktion einer Wahrscheinlichkeitsverteilung gibt die kumulierte Wahrscheinlichkeit an, also die Integration über einen bestimmten Wahrscheinlichkeitsbereich. Im Falle der Überlagerung von Signal und Rauschen entspricht dies der rot schraffierten Fläche (3.12b), also genau dem Bereich, der oberhalb des Rauschens liegt. Entfernt sich das Objekt vom Sensor, so verschiebt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Messsignals zum Rauschen hin, bis diese überlappen (d_2) und anschließend der Rauschanteil überwiegt. Im Überlappungsbereich ist der kumulierte Anteil geringer und

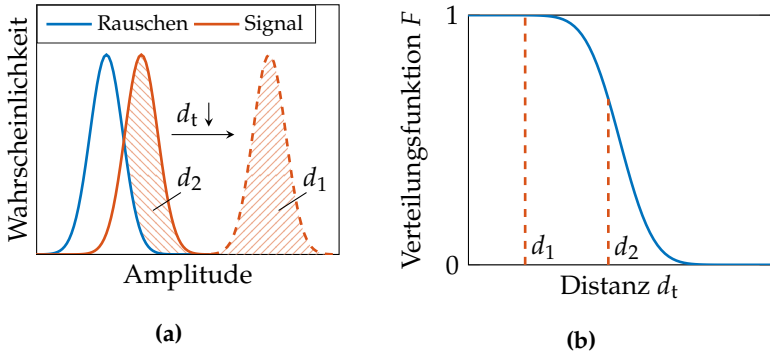


Abbildung 3.12: Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Messsignals (rot) sowie des Rauschens (blau) in (a). Entfernt sich das Objekt weiter vom Sensor, so nähert sich die Verteilung des Messsignals dem Rauschen an. Die Verteilungsfunktion F ergibt sich aus der schraffierten Fläche, also dem Signalanteil oberhalb des Rauschanteils (b).

nähert sich mit weiter steigender Distanz dem Nullwert an. Aufgrund der Unbekanntheit der Verteilungen wird hier eine Gaußverteilung für die Fitfunktion angenommen. Die (umgekehrte) Verteilungsfunktion F einer Gaußverteilung wird durch die Fehlerfunktion erf beschrieben gemäß

$$F(d_t) = \frac{1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{d_t - d_0}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right). \quad (3.3)$$

Die Standardabweichung σ beschreibt die Breite der Wahrscheinlichkeitsverteilung und wirkt sich in der Verteilungsfunktion als die distanzabhängige Steigung aus. Die Achsenverschiebung d_0 beschreibt genau den Distanzwert, an dem die Verteilungsfunktion auf die Hälfte ($F = 0,5$) gefallen ist. Durch die Verwendung von Gleichung (3.3) als Fit der Erfolgswahrscheinlichkeiten entspricht d_0 somit direkt der maximalen Reichweite $d_{\max}^{0,5}$ bei der Detektionsschwelle $p_{\min}^{0,5}$. Die maximale Reichweite $d_{\max}^{0,95}$ wird durch Verschieben der Fitkurve um den Wert $\Delta F = 0,95$ und anschließender Nullstellenbestimmung ermittelt.

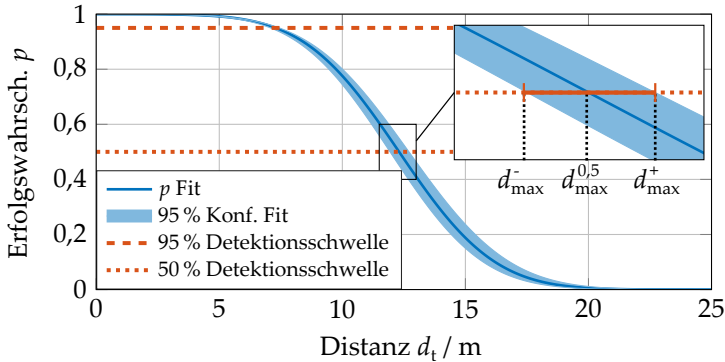


Abbildung 3.13: Fit der Fehlerfunktion an die Mittelwerte der Daten in Abbildung 3.11 (dunkelblau). Die Konfidenzintervalle (blau hinterlegt) wurden durch Fits an die Fehlergrenzen der Daten erstellt. An den Schnittpunkten mit den Detektionsschwellen $p_{\min}^{0,5}$ und $p_{\min}^{0,95}$ (rot gestrichelt) kann die maximale Reichweite d_{\max} inklusive der Fehler d_{\max}^- bzw. d_{\max}^+ für beide Schwellen ausgelesen werden.

Für das Beispiel der Probe B4 ist der Fit mit Gleichung (3.3) in Abbildung 3.13 in dunkelblau gezeigt. Der hellblau umrandete Bereich um die Fitkurve wird durch weitere Fits durch die jeweiligen Konfidenzintervalle (Fehlerbalken in Abbildung 3.11) erstellt und beschreibt den Fehlerbereich der Fitfunktion. In rot sind jeweils die beiden Schwellenwerte $p_{\min}^{0,5}$ und $p_{\min}^{0,95}$ eingezeichnet. Aus den Schnittpunkten der Schwellenwerte mit der Fitfunktion sowie dem Konfidenzintervall können die maximale Sensorreichweite $d_{\max}^{0,5}$ bzw. $d_{\max}^{0,95}$ mit dazugehörigen Fehlergrenzen d_{\max}^- bzw. d_{\max}^+ ausgelesen werden (vergrößert dargestellt). Für das Beispiel B4 ergeben sich $d_{\max}^{0,5} = 12,31$ m mit $d_{\max}^- = 11,94$ m und $d_{\max}^+ = 12,71$ m sowie $d_{\max}^{0,95} = 7,30$ m mit $d_{\max}^- = 7,08$ m und $d_{\max}^+ = 7,44$ m.

Das in diesem Abschnitt vorgestellte Verfahren zeigt den vollständigen Auswerteprozess der Messdaten einer einzelnen Verschmut-

zungsprobe. Der Prozess wird gleichermaßen mit allen 15 Proben (siehe Abschnitt 3.2.1) durchgeführt, sodass für jede Probe die maximale Reichweite d_{\max} für beide Detektionsschwellen $p_{\min}^{0,5}$ und $p_{\min}^{0,95}$ bestimmt wird. Die daraus ermittelten Werte werden im folgenden Abschnitt zur quantitativen Beschreibung mit den Transmissionswerten verknüpft.

3.3.3 SENSORREICHWEITE UND TRANSMISSIONSVERLUST

Aufgrund der großen Datenmenge wurde die vollständige Auswertung nur für eine einzelne Probe gezeigt. Dabei wurde die Darstellung der Punktwolken und der Histogramme beispielhaft auf relevante Ausschnitte limitiert. Der Ergebnisteil beschränkt sich somit nur auf die relevanten Endergebnisse wie die Darstellung der Erfolgswahrscheinlichkeiten und des Zusammenhangs der Sensorreichweite zur Proben-Transmission für alle Proben.

Für alle 15 Proben sind jeweils die Erfolgswahrscheinlichkeiten p , die sich aus den Binomial-Fits ergeben, zusammen mit den jeweiligen Konfidenzintervallen und den daraus resultierenden Fits der Fehlerfunktion in Abbildung 3.14 dargestellt. Die Grafiken sind hierbei jeweils nach Probentyp unterteilt. Der jeder Probe zugehörige Transmissionswert ist in Tabelle A.1 im Anhang zu finden. Für jeden Probentyp sind die Proben jeweils nach abfallender Transmission sortiert. Mit fallender Transmission, also stärkerem Verschmutzungsgrad, verschiebt sich der Mittelpunkt der Fehlerfunktion unabhängig von der Art der Verunreinigung wie erwartet zu kleinen Distanzen hin. Die Sensorreichweite nimmt somit ab. Vereinzelt sind Ausreißer erkennbar (z.B. bei A1, $d_t = 15$ m), deren Mittelwert nicht im Konfidenzintervall liegt. Die statistischen Fehler liegen allerdings immer im Konfidenzintervall der gefitteten Erfolgswahrscheinlichkeit.

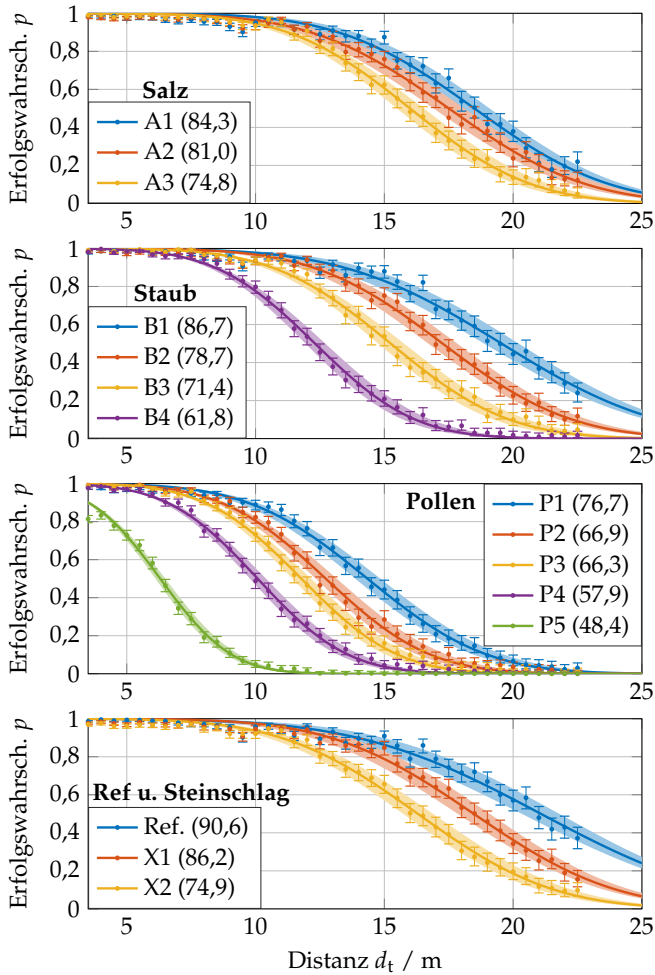


Abbildung 3.14: Erfolgswahrscheinlichkeiten mit zugehörigen Fits und Konfidenzintervallen, aufgeteilt nach Proben­typ und steigendem Verschmutzungs­grad (Transmissionswert T_{850} angegeben in Prozent). Je geringer die Transmission, desto geringer wird die maximale Sensorreichweite. Bedingt durch die quadratische Abhängigkeit der Empfangsleistung zur Distanz ist der Verlauf bei großem Verschmutzungsgrad und somit kleineren Distanzen steiler.

Neben der Verschiebung wird die Steigung der verschiedenen Fits zu kleinen Distanzen hin größer. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit des Empfangssignals von der Distanz steigt dieses zu kleinen Distanzen hin immer schneller an, sodass sich das Signal auch schneller vom Rauschlevel entfernt.

Die maximale Reichweite wird aus allen gezeigten Kurven bei $p_{\min}^{0,5}$ und $p_{\min}^{0,95}$ inklusive Fehlergrenzen ausgelesen. Für die Zuordnung der Distanzen zur Transmission muss beachtet werden, dass aufgrund der beschränkten Länge des Labors die Sensorreichweite durch Verwendung eines ND-Filters mit $T = 63,2\%$ zu kleineren Distanzen skaliert wurde. Die Zuordnung der Distanzen erfolgt deshalb nicht zur Proben-Transmission allein, sondern zur Gesamttransmission $T_{\text{ges}} = 0,632 \cdot T_{850}$ (siehe Tabelle A.1). Die Referenzprobe wird somit auch als Verschmutzungsprobe angesehen, da sowohl durch die saubere Platte als auch den zusätzlichen ND-Filter die Sende- bzw. Empfangsleistung reduziert wird. Im späteren Verlauf wird die durch die Verunreinigungen hervorgerufene Abschwächung dann umgerechnet.

Die resultierenden maximalen Reichweiten sind in Abbildung 3.15 farblich nach Probentyp aufgeteilt dargestellt. Die x-Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung s_{ges} (Tabelle A.1) aus den Messungen der Proben-Transmission, die y-Fehlerbalken werden aus den Fits der Konfidenzintervalle in Abbildung 3.14 entnommen. Die beiden Ellipsen zeigen jeweils die Aufteilung nach den unterschiedlichen Schwellwerten für die minimale Detektionswahrscheinlichkeit bei 50 % und 95 %. Man beachte, dass der zu Probe P5 zugehörige Distanzwert bei $p_{\min}^{0,95}$ nicht ausgewertet wurde, da dieser die zuvor ermittelte minimale Messdistanz d_{\min} (grau schraffierter Bereich) unterschreitet. Im Falle einer Detektionsschwelle von 50 % wird durch die erstellten Verschmutzungsproben zusammen mit dem ND-Filter nahezu

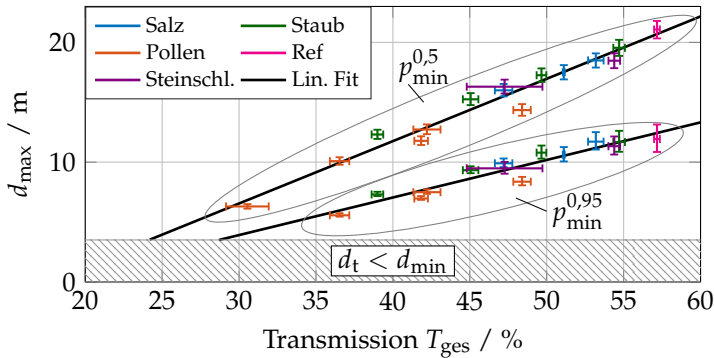


Abbildung 3.15: Ermittelte maximale Reichweite d_{\max} für alle verwendeten Proben mit gesamter Transmission T_{ges} . Die Ergebnisse sind farblich nach dem jeweiligen Probenotyp unterteilt. Die beiden Ellipsen teilen die Ergebnisse nach den beiden Detektionsschwellen $p_{\min}^{0,5}$ und $p_{\min}^{0,95}$ auf. Durch die Verringerung der Transmission sinkt die maximale Reichweite linear, bis die minimale Messdistanz d_{\min} unterschritten wird. Die schwarzen Kurven zeigen jeweils den linearen Fit für beide Detektionsschwellen.

der gesamte mögliche Messbereich im Labor mit einer maximalen Reichweite von 21 m für die Referenzprobe genutzt. Mit steigendem Verschmutzungsgrad und damit geringerer Transmission fällt die maximale Reichweite linear bis zu $d_{\max}^{0,5} = 6,3\text{ m}$ für die Probe P5 mit der geringsten Transmission ab. Ein ähnlicher Verlauf zeigt sich bei einer Detektionsschwelle von 95 %. Die Sensorreichweite für die Referenzprobe beträgt hier 12 m und fällt ebenfalls linear, mit größerer Steigung, bis in den Bereich unterhalb der minimalen Distanz ab. Der lineare Verlauf gilt für alle Probenotypen (Salz, Staub, Pollen), deren Ergebnisse keine wesentlichen Abweichungen von diesem Verlauf aufweisen. Die gleiche Aussage trifft auch auf die durch Steinschlag hergestellten Proben zu, für die allerdings Probe X2 durch die große Standardabweichung der Transmissionsmessung heraussticht. Aus Gleichung (2.12) wird bereits ein linearer Zusammenhang zwischen

maximaler Reichweite und Transmission erwartet, weshalb hier ein linearer Fit zur Beschreibung der Messdaten verwendet wird (jeweils schwarze Gerade) gemäß

$$d_{\max} = cT_{\text{ges}} - d_0. \quad (3.4)$$

Die Konstante c beinhaltet alle Systemparameter des Sensors, die hier unbekannt sind und beschreibt den linearen Verlust durch eine Verringerung der Transmission aufgrund von Verunreinigungen. Für die beiden festgelegten Detektionsschwellen folgt $c_{0,5} = 0,52$ m und $d_0^{0,5} = -9,1$ m bzw. $c_{0,95} = 0,31$ m und $d_0^{0,95} = -5,5$ m. Der aus Kapitel 2.2.5 erwartete lineare Zusammenhang ist somit klar erkennbar, weist allerdings eine Verschiebung zu kleineren Distanzen hin auf und verläuft nicht durch den Ursprung. Die Verschiebung beschreibt eine minimale Transmission, die notwendig ist, um Objekte oberhalb der Systemschwelle d_{\min} überhaupt detektieren zu können. Ursache für die Verschiebung ist möglicherweise der Einfluss der Proben auf das Hintergrundrauschen im System. Während sich durch die verringerte Transmission die Hintergrundstrahlung ebenfalls verringert, wird der durch Streuung induzierte Rauschanteil mit steigendem Verschmutzungsgrad größer. Welcher Anteil bei welchem Verschmutzungsgrad überwiegt, bedarf weiteren Untersuchungen, die in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden.

Bedingt durch die Größe des Testlabors wurde die eigentliche Sensorreichweite durch die Verwendung eines ND-Filters zu geringeren Distanzen skaliert. Die hergestellten Proben haben somit nur teilweise zur Verringerung der Transmission beigetragen. Um den alleinigen Einfluss durch die Verunreinigungen zu betrachten, können die Fitfunktionen nach Gleichung (3.4) im relevanten Transmissionsbereich betrachtet werden. Neben den untersuchten Störeinflüssen durch Staub, Salz, Pollen und Steinschläge stellen an der Schutzscheibe anhaftende Wassertropfen in Regen die häufigste Beeinträchtigung dar.

Im nächsten Abschnitt wird die durch Wassertropfen induzierte Transmissionsänderung gezeigt. Abschließend werden alle Ergebnisse mit den Fitfunktionen in Verbindung gebracht bevor eine Reichweiteabschätzung erfolgt.

3.3.4 EINFLUSS VON REGENTROPFEN

In der Untersuchung des Verschmutzungseinflusses wurden Proben mit anhaftenden Wassertropfen bisher nicht betrachtet. Diese können nicht für das gezeigte Verfahren der vorherigen Abschnitte verwendet werden, da die Aufnahme der Messdaten (41 Messpositionen mit je 4 s Messzeit) die Beständigkeitsdauer der Proben überschreitet. Für Transmissionsmessungen können dennoch Proben mit Wassertropfen erstellt werden. Dazu wird der bereits vorgestellte Transmissionsaufbau aus Kapitel 3.2.2 verwendet, in dem die Transmissionsmessung gemittelt über einen Messbereich mit einem Durchmesser von 18 mm durchgeführt wird.

Die Wassertropfen werden analog zu den Verschmutzungsproben auf 3 mm dicke Polycarbonatplatten aufgetragen. Abbildung 3.16 zeigt sechs Fotos des Messbereichs (grün umrandet) der Platten. Das erste Bild zeigt die saubere Platte, deren Transmission als Referenzwert verwendet wird, da die Betrachtung ausschließlich auf den durch die Tropfen verursachten Transmissionsverlust ausgelegt ist. Der Transmissionswert ist jeweils in der oberen rechten Ecke angegeben. Während des Sprühvorgangs ist die Platte bereits im Aufbau integriert, sodass nach jedem Sprühen das Foto aufgenommen sowie die aktuelle Transmission dazu gemessen wird. Die unterschiedlichen Tropfenverteilungen zeigen, dass sich bereits bei sehr geringen Wassermengen und kleinen Tropfen ((2),(3)) die Transmission bis zu $T \approx 75\%$ reduziert. Durch weiteres Besprühen vereinigen sich die Tropfen immer

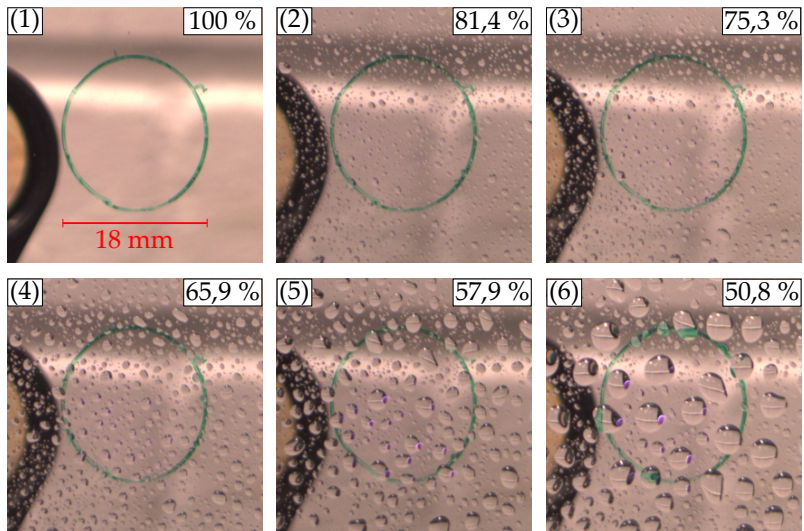


Abbildung 3.16: Verteilungen anhaftender Tropfen mit jeweiliger Angabe der Transmission, referenziert auf die saubere Probe (1). Der grüne Bereich stellt den Messbereich dar, über den gemittelt wird. Durch Anlagerung und Vereinigung einzelner kleiner Tropfen sinkt die Transmission bis zu einem Minimum von ca. 50 % ab (2)-(6).

weiter, sodass große Tropfenansammlungen mit kleineren Tropfen in den Zwischenräumen entstehen ((4)-(6)). Die Transmission sinkt dabei immer weiter ab und erreicht Werte bis zu ca. 50 %. Bei weiterem Besprühen laufen die größeren Tropfen an der Platte nach unten, sodass sich neue, kleinere Tropfen ansammeln. Die Anhaftbedingungen sind materialabhängig und können je nach Wahl der Schutzscheibe abweichen. Weiterhin sind hier nur Tropfenansammlungen gezeigt, die bei Stillstand des Fahrzeugs oder als Momentaufnahme entstehen. Während der Fahrt können durch den Luftstrom auch herablaufende Tropfen entstehen, die hier nicht weiter untersucht werden.

Obwohl Wasser grundsätzlich einen gewissen Strahlungsanteil transmittiert, wird durch die gekrümmte Tropfenform dennoch nahezu der vollständige Strahlungsanteil gebrochen, der den Tropfen trifft (vergleiche Abbildung 2.6). Dadurch können im Regenfall hohe Einschränkungen der Sensorleistung erwartet werden, die hier durch Transmissionsmessungen bis hin zu $T = 50\%$ gezeigt wurden. Der Wertebereich $50\% \leq T \leq 100\%$ entspricht in etwa dem Wertebereich, in dem die hergestellten Verschmutzungsproben liegen. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse zusammengefasst und mit der Relation in Gleichung (3.4) verknüpft.

3.3.5 INTERPRETATION UND AUSBLICK

Unter Verwendung der hergestellten Verschmutzungsproben als definierte Verunreinigung auf LiDAR-Sensoren wurde ein Verfahren vorgestellt, wie die maximale Sensorreichweite abhängig vom Verschmutzungsgrad experimentell ermittelt werden kann. Der Verschmutzungsgrad wird dabei durch Messung der Probentransmission bestimmt, die wiederum mit der Sensorreichweite verknüpft wird. Aufgrund der eingeschränkten Länge des Labors wurden die Verschmutzungsgrade mit einem ND-Filter skaliert, sodass die eigentliche experimentelle Untersuchung nur auf sehr starke Verschmutzungen ausgelegt war. Der daraus resultierende Zusammenhang von maximaler Distanz und Transmission wird in Abbildung 3.17 aus dem untersuchten Datenbereich (grau) auf den Transmissionsbereich erweitert, der ausschließlich durch die Verunreinigungen erzeugt wurde (blau). Dazu werden die Transmissionswerte T_{850} in Tabelle A.1 ohne den Einfluss des ND-Filters betrachtet. Gleichzeitig wird auch der Einfluss der Referenzprobe (saubere Platte) weggelassen, sodass die Transmissionswerte der Proben in einem Bereich von $53,4\% \leq T \leq 100\%$ liegen. Hierbei muss

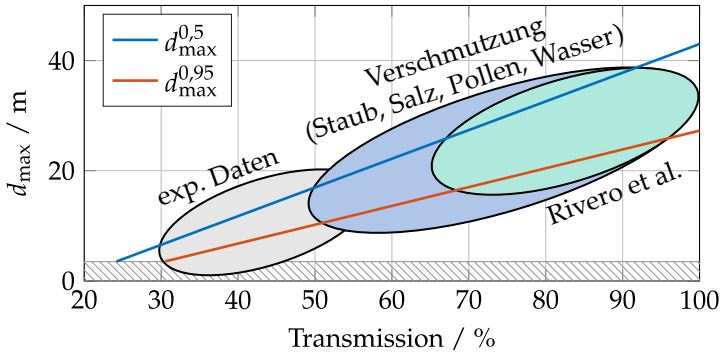


Abbildung 3.17: Extrapolation der Fitfunktion aus den experimentellen Daten (grau) für $d_{\max}^{0,5}$ und $d_{\max}^{0,95}$ in den Bereich realistischer Verschmutzungsgrade. Dazu werden die Bereiche aus den Ergebnissen in [43] von $65\% \leq T \leq 100\%$ (grün) bzw. aus den selbst hergestellten Verschmutzungsproben und Messungen mit Wassertropfen $50\% \leq T \leq 100\%$ (blau) verwendet. Für sehr starke Verschmutzungsgrad mit $T = 50\%$ reduziert sich die maximale Reichweite um bis zu 60%.

beachtet werden, dass die starken Verschmutzungsgrade deutlich seltener auftreten, dennoch beispielsweise bei längerem Stillstand des Fahrzeugs möglich sind. Der Wertebereich wurde im vorherigen Abschnitt durch die Betrachtung der Transmission durch anhaftende Wassertropfen erweitert, die einen dynamischen Verlust bei Regen darstellen. Der resultierende Verlustbereich liegt in einem ähnlichen Bereich von $50\% \leq T \leq 100\%$. Aus der Literatur sind zusätzlich Transmissionsmessungen bekannt, die an am Auto befestigten Kunststoffplatten nach längerer Fahrt durchgeführt wurden [43]. Durch Ansammlung von verschiedenen Verunreinigungen sind dort Reduzierungen der Transmission im Bereich $65\% \leq T \leq 100\%$ gezeigt (grüner Bereich). Die Betrachtung beschränkt sich allerdings auf wenige feste Verunreinigungen, die sich direkt während der Fahrt anlagern und beinhaltet keine Untersuchung von Wasser. Die Ellipsen zeigen jeweils den

Distanzbereich, der abhängig von der momentanen Verschmutzung maximal erreicht werden kann. Wie groß der Verschmutzungsgrad ist, variiert sehr stark abhängig von den äußeren Bedingungen. Dennoch kann angenommen werden, dass Verschmutzungsgrade mit einer dazugehörigen Transmission von 65 % häufig auftreten, während sehr starke Verschmutzungsgrade bis zu 50 % Transmission, insbesondere für feste Verunreinigungen, seltener auftreten. Die maximale Distanz des Sensors wird für eine saubere Schutzscheibe definiert und beträgt hier $d_{\max}^{0,5} = 43$ m bzw. $d_{\max}^{0,95} = 27$ m für ein Objekt mit 10 % Reflektivität. Die vom Hersteller angegebene Reichweite von 60 m bei $p_{\min} = 50$ % und 10 % Reflektivität kann somit nicht erreicht werden. Bei einer Reduzierung der Transmission auf 70 % verringert sich die maximale Reichweite auf $d_{\max}^{0,5} = 27$ m bzw. $d_{\max}^{0,95} = 17$ m, also um 37 %. Für sehr starke Verunreinigungen bis zu $T = 50$ % werden nur noch Distanzen bis $d_{\max}^{0,5} = 17$ m bzw. $d_{\max}^{0,95} = 10$ m erreicht, sodass die Sensorreichweite um ca. 60 % reduziert wird.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs der Reichweite zum Verschmutzungsgrad wurden Verunreinigungen homogen über die gesamte Platte verteilt, um einen Positionseinfluss zu minimieren. Die Ergebnisse sind abhängig von der Transmission, die jeweils lokal an verschiedenen Positionen betrachtet werden muss und sich im Realfall über die Schutzscheibe hinweg verändern kann. Damit verbunden variiert auch die Reichweite, je nach Verschmutzungssituation, mit dem jeweils zum Austrittsfenster verbundenen Sichtbereich.

Grundsätzlich gilt zu beachten, dass die gezeigte Charakteristik sensorspezifisch ist und hier auf ein einzelnes, definiertes Objekt limitiert ist. Für allgemeinere Aussagen ist die Untersuchung auf verschiedene Sensoren und unterschiedliche Testobjekte zu erweitern. Weiterhin bietet sich eine Untersuchung im Freien oder in einem hinreichend großen Testlabor an, sodass auf die Verwendung von ND-Filtern zur

Skalierung des Messbereichs verzichtet werden kann. Dabei muss allerdings der Einfluss der veränderlichen Hintergrundstrahlung beachtet werden, der ebenfalls mit der Verschmutzung korrelieren kann. Zur Untersuchung der Hintergrundstrahlung ist die Verwendung eines Sensors mit Zugriff auf die Rohdaten und die vollständigen Systemparameter sinnvoll, damit Aussagen über den Rauscheinfluss getroffen werden können. Genannte Betrachtungen sind allerdings nicht mehr Teil dieser Arbeit, bieten aber viele mögliche Ansätze zur Weiterarbeit.

In diesem Kapitel wurde der Einfluss von anhaftenden Verunreinigungen wie Staub, Salz, Pollen und Wassertropfen sowie von Steinschlägen auf die Sensorleistung untersucht. Dabei wurde insbesondere die Einschränkung der Sensorreichweite betrachtet, die in Extremsituationen um bis zu 60 % reduziert wird. Wie stark diese Reduzierung ist, ist eine sensorabhängige Größe und kann nicht allgemein beschrieben werden. Dennoch ist die Funktionalität des Sensors immer durch die detektierte Leistung beschränkt, die wesentlich durch die Verunreinigungen beeinflusst wird. Die gleiche Problematik ist bereits von der Sichteinschränkung durch die Windschutzscheibe bei Regen oder nach längerem Stillstand des Fahrzeugs bekannt. Als Lösung wird die Windschutzscheibe, meist durch einen Scheibenwischer und ein zusätzliches Spritzwasser-System, gereinigt. Analog kann auch die Schutzscheibe von LiDAR-Sensoren durch ein solches System gereinigt werden. Für die Verwendung in hochautomatisiert fahrenden Fahrzeugen wird dazu eine Zusatzfunktion benötigt, die den Verschmutzungsgrad auf der Schutzscheibe erkennt und das Reinigungssystem steuern kann. Hier gilt insbesondere zu beachten, dass in den gezeigten Sensormessungen Objekte erst ab einer Mindestreichweite erkannt werden, sodass eine zusätzliche Sensorik für die Erkennung der Verunreinigungen benötigt wird. Wie eine solche Sensorik aussehen kann, wird in den folgenden beiden Kapiteln dieser Arbeit beschrieben.

KAPITEL 4

DETEKTION VON VERUNREINIGUNGEN: MÖGLICHKEITEN UND AUSWAHLVERFAHREN

Im vorherigen Kapitel wurde der Einfluss von anhaftenden Verunreinigungen wie Regentropfen oder festeren Partikeln auf LiDAR-Sensoren untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine hohe Anfälligkeit von LiDAR-Sensoren gegenüber Verunreinigungen. Die Folge ist eine starke Einschränkung der Sensorleistung, insbesondere im Bezug zur maximalen Systemreichweite. Eine Reinigung der Sensoroberfläche scheint demnach unumgänglich. Mit dem Ziel des hochautomatisierten Fahrens muss das verwendete Reinigungssystem vollautomatisch gesteuert werden. Um die Reinigung auszulösen, muss der Verschmutzungszustand der Schutzscheibe kontinuierlich überwacht werden. Dazu existieren bereits verschiedene Methoden, die sich für vergleichbare Sensoren wie Kameras oder für die Überwachung von Windschutzscheiben etabliert haben. Im ersten Teil des Kapitels werden diese bereits bekannten Möglichkeiten zusammengefasst und die Übertragung auf LiDAR-Sensoren untersucht. Da die Methoden in ihrer Funktion limitiert sind, werden im weiteren Verlauf des Kapitels neue Verfahren vorgestellt, die diese Limitierungen aufheben können. Die Verfahren unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht, beispielsweise durch Komplexität, Kosten und Funktionalität. Diese Eigenschaften werden anhand

verschiedener Messsysteme evaluiert, sodass die Vor- und Nachteile in einer finalen Analyse ausgewertet werden können.

4.1 STAND DER TECHNIK

Aus dem Stand der Technik sind bereits viele Verfahren bekannt, die die Überwachung einer optischen Abschlusscheibe ermöglichen. Die meisten dieser Ideen stammen aus der Anwendung als Regensensoren an Windschutzscheiben von Fahrzeugen und werden zur Steuerung der Scheibenwischer verwendet. Generell unterscheiden sich die Verfahren in der verwendeten Sensorik, wobei sich die optisch basierte Sensorik (Kamera und Photodioden) weitestgehend durchgesetzt hat. In den nächsten Abschnitten werden die Methoden ausführlich analysiert und dabei insbesondere die Integration in LiDAR-Sensoren betrachtet.

4.1.1 KAMERABASIERTE REGENSENSOREN

Die Nutzung von Kamerasensoren zur Detektion von Verunreinigungen auf Windschutzscheiben wird bereits seit vielen Jahren untersucht. Das grundlegende Prinzip ist in Abbildung 4.1 skizziert. Mit einer Lichtquelle wird ein bestimmter Bereich der Windschutzscheibe beleuchtet, sodass anhaftende Partikel oder Wassertropfen auf der Außenseite einen Anteil der Strahlung streuen. Die beleuchtete Fläche wird generell so gewählt, dass die Sicht des Fahrers durch die Komponenten nicht beeinträchtigt ist. Mit verschiedenen optischen Elementen wird die gestreute Strahlung aufgesammelt und auf einem Kamerachip abgebildet. Anhand der gemessenen Intensität der

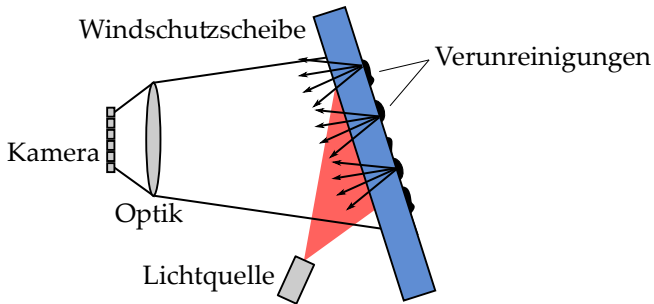


Abbildung 4.1: Detektion von Verunreinigungen auf der Oberfläche von Windschutzscheiben durch die Anbringung von Kameras im Fahrzeuginneren. Durch Aussenden von Strahlung in einen Bereich der Windschutzscheibe kann die gestreute Strahlung aus diesem Bereich untersucht werden.

einzelnen Kamerapixel kann die Oberfläche der Windschutzscheibe analysiert werden. Zu diesem Grundprinzip existieren zahlreiche Patentanmeldungen [46, 47, 48, 49, 50], die sich insbesondere durch die Positionierung der Komponenten und die Auswahl der optischen Elemente unterscheiden. Diese vorgestellten Systeme sind sehr anfällig gegenüber Hintergrundbeleuchtung, die ausgehend von Objekten aus der Umgebung des Fahrzeugs ebenfalls auf den Sensor abgebildet wird. In [51, 52, 53] werden Systeme vorgestellt, die dieses Problem umgehen sollen. Durch Verwendungen mehrerer räumlich versetzter Bildsensoren mit unterschiedlichem Abstand zur Scheibe und jeweils separater Optik werden mehrere Bilder der Szene aufgenommen. Während Objekte aus der Entfernung zwei nahezu gleiche Bilder erzeugen, ergeben Objekte auf der Scheibe durch den unterschiedlichen Winkel zu den Sensoren zwei deutlich verschiedene Bilder. Durch Differenzbildung der beiden Bilder können somit die Verunreinigungen auf der Scheibe isoliert werden.

Ein weiterer Ansatz wird in [54] beschrieben. Statt einer direkten Beleuchtung der Windschutzscheibe wird ein Lichtleiter an die Innenseite

der Windschutzscheibe angebracht. Durch Einbringung von Streupartikeln in den Lichtleiter und Einkopplung von Strahlung in diesen wird die Windschutzscheibe indirekt durch die streuenden Partikel beleuchtet. Die Streuung an den Verunreinigungen wird dann analog zu den bisher gezeigten Verfahren mit einem Kamerasensor gemessen. Durch sequentielle Änderung der Beleuchtungsstärke des Lichtleiters werden aufeinanderfolgende Bilder durch Differenzbildung miteinander verglichen, sodass der Einfluss der Hintergrundbeleuchtung minimiert wird.

Für die Realisierung der bisher genannten Systeme sind zusätzliche Komponenten wie der Kamerachip und die verwendete Optik notwendig, um die Funktion der Windschutzscheibenüberwachung zu ermöglichen. Mit der Entwicklung von ADAS in modernen Fahrzeugen werden ohnehin Kameras hinter der Windschutzscheibe eingesetzt, die die Fahrzeugumgebung überwachen. Aus diesem Grund sind weitere Ansätze entstanden, wie diese Kameras direkt die Funktion eines Regensensors übernehmen können. Die Information über den Zustand der Scheibe wird aus der Bildverarbeitung des Kamerabildes entnommen. Dabei können unterschiedliche Methoden angewendet werden, die markante Regionen im Bild in Bezug zur Änderung von Intensitäts- oder Grauwerten identifizieren. Weit verbreitete Methoden sind beispielsweise die Erkennung von Kanten (engl. edge detection) [55, 56, 57, 58] oder bestimmter Segmente (engl. blob detection) [59, 60], an denen Intensitätswerte sprunghafte Änderungen aufweisen. In [59, 61] werden die Regentropfen als Kugelkappen modelliert und das Reflexionsverhalten des Lichts in jedem erkannten Tropfen beschrieben. Zusätzlich wird berücksichtigt, dass der Bereich der Windschutzscheibe bei den verwendeten ADAS-Kameras nicht im Schärfentiefebereich liegt. Mittels blob detection können dann einzelne Tropfen aus dem Kamerabild separiert werden.

Die Bildauswertung der Kamerabilder erfordert eine sehr hohe Rechenkapazität, sodass sie bei vielen der genannten Methoden nicht hinreichend schnell erfolgen kann. In [56] wird deshalb gezeigt, wie die Erkennung der Tropfen durch neuronale Netze echtzeitfähig gemacht werden kann.

In allen bisher vorgestellten Methoden werden die Tropfen durch eine Objekterkennung identifiziert. Ein anderer Ansatz wird in [62] verfolgt. Durch die Wirkung jedes einzelnen Tropfens als Linse wird die im Tropfen sichtbare Szene verkleinert. Bei Betrachtung von aufeinanderfolgenden Bildern bewegt sich die Szene aufgrund der Verkleinerung langsamer als in den Bereichen, die nicht durch einen Tropfen abgebildet werden. Dadurch können die mit Tropfen verunreinigten Segmente von den sauberen getrennt werden.

Alle genannten Systeme liefern direkt die Information über die genauen Positionen der Regentropfen auf der Windschutzscheibe und eignen sich somit für die Steuerung der Scheibenwischer. Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieser Positionskennntnis ist die Möglichkeit, die zugrundeliegende Szene (ohne anhaftende Tropfen) teilweise rekonstruieren zu können [63, 64, 65]. Aufgrund der unterschiedlichen Funktionsweise ist dieser Vorteil aber nicht auf LiDAR-Sensoren übertragbar.

INTEGRATION IN LiDAR

Prinzipiell ist der Grundgedanke der Tropfenerkennung durch Kamera-Systeme nach Abbildung 4.1 in LiDAR-Systeme integrierbar. Da LiDAR-Sensoren im Gegensatz zu den ADAS-Kameras nicht hinter der Windschutzscheibe angebracht werden, müsste die benötigte Sensorik zusätzlich integriert werden. Ein vollständiges Kamera-Modul

wie die ADAS-Kamera mit Mustererkennung der Bilddaten kommt dabei aus Kosten- und Komplexitätsgründen nicht in Frage. Zusätzlich würden einige Probleme wie die Detektion von False Positives durch die Szenerie im Hintergrund oder die hohe notwendige Rechenleistung bestehen bleiben. Einfachere Anordnungen photoempfindlicher Sensoren zur Detektion von Streulicht an der Windschutzscheibenoberfläche sind weiterhin interessant für die Anwendung in LiDAR-Sensoren. In [66] wird ein solcher Sensor zur Detektion von Regentropfen unmittelbar vor Auftreffen auf der Windschutzscheibe gezeigt, der auf einer einzelnen Photodiode als Detektor beruht. Erste Ergebnisse zeigen die Möglichkeit, stärkeren und schwächeren Regen zu unterscheiden. Eine Validierung der Systemgrenzen dieser vereinfachten Möglichkeit zur Detektion von Streulicht wurde bisher nicht gezeigt und folgt in einer Untersuchung in Kapitel 4.4.

4.1.2 TIR-REGENSENSOR

In nahezu allen modernen Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse wird ein auf Totalreflexion (engl. total internal reflection, TIR) basierender Regensensor zur automatischen Steuerung der Scheibenwischer verbaut. Das Prinzip beruht auf der Reflexion elektromagnetischer Strahlung innerhalb der Windschutzscheibe und hat sich weitestgehend gegen kamerabasierte Systeme durchsetzen können. Abbildung 4.2 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Ausgehend von einer Lichtquelle, die in der Regel aus einer infraroten LED besteht, wird Licht in die Windschutzscheibe eingekoppelt. Um einen geeigneten Winkel in der Scheibe zu erzielen, kann die Lichtverteilung zusätzlich durch eine Optik vor der Einkopplung angepasst werden. Damit das Licht überhaupt in die Scheibe einkoppeln kann und nicht an der Innenseite reflektiert, wird eine prismenähnliche Struktur (Koppler) an

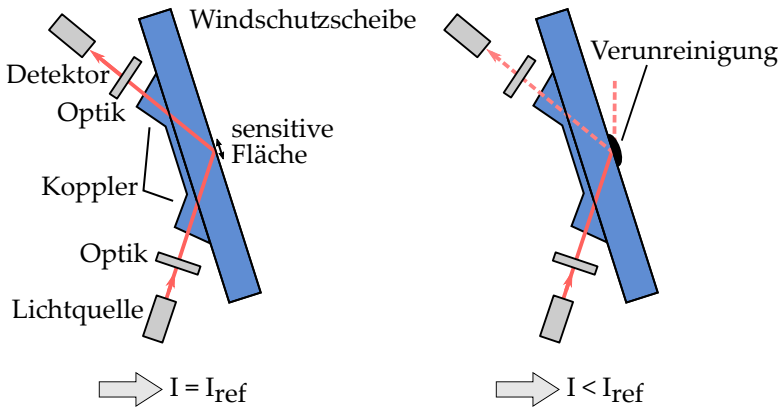


Abbildung 4.2: Aufbau eines konventionellen TIR-Regensensors an Windschutzscheiben. An einer sauberen Scheibe findet aufgrund der Brechungsindexunterschiede eine Totalreflexion an der Außenseite der Scheibe statt. Haften Verunreinigungen an der Oberfläche an, so koppelt ein Teil der Strahlung aufgrund des veränderten Brechungsindex an diesen Stellen aus. Die Messung des Verlustes erlaubt Rückschlüsse über den Verschmutzungsgrad der Scheibe.

der Scheibe befestigt, um die Einfallswinkel zu minimieren. Propagiert das Licht mit einem Winkel oberhalb des Grenzwinkels der Totalreflexion für den Übergang von der Scheibe zur Umgebung (Luft), so ist die Reflexion nahezu verlustfrei. Durch Anbringung eines weiteren Prismas koppelt das Licht aus der Scheibe aus und kann mittels einer zweiten Optik gesammelt und von einem photoempfindlichen Detektor, wie beispielsweise einer Photodiode, gemessen werden. Bei sauberer Scheibe wird ein Referenzsignal I_{ref} gemessen. Haften nun Verunreinigungen an der Außenseite der Windschutzscheibe an, so ändert sich an diesen Stellen der äußere Brechungsindex und damit auch der Grenzwinkel der Totalreflexion. Ein Teil der Strahlung koppelt folglich an den Verunreinigungen aus und das gemessene Signal I sinkt. Der Signalverlust ist abhängig von dem Verschmutzungsgrad

auf der Scheibe. Fällt dieser unter einen festgelegten Schwellwert, so kann die Reinigung mit der notwendigen Wischgeschwindigkeit angestoßen werden. Der Regensensor überwacht somit nur den Teilbereich der Windschutzscheibe, an dem die Totalreflexion stattfindet. Dieser Bereich entspricht der sensitiven Fläche des Sensors und befindet sich für gewöhnlich hinter dem Fahrzeuginnenspiegel, um die Sicht des Fahrers nicht einzuschränken. Der überwachte Teilbereich wird somit auf die komplette Windschutzscheibe extrapoliert. Das Gesamtsystem wird verlässlicher, je größer die sensitive Fläche ist [67].

Zu verschiedenen Ausführungen solcher Regensensoren existieren zahlreiche Patentanmeldungen, die sich in der Auswahl und Anzahl der verwendeten Komponenten oder verschiedener Verbesserungsansätze von auftretenden Problemen unterscheiden. Grundsätzlich steht neben einer ordnungsgemäßen Funktion auch häufig die Reduzierung von Kosten im Vordergrund der Anmeldungen. Einige Beispiele sollen deshalb nun näher untersucht werden.

Generell treten Komplikationen in der Befestigung der Ein- und Auskoppelelemente an der Windschutzscheibe auf. Das Licht kann nur über den Koppler in die Scheibe propagieren, wenn sich keine Luftschicht zwischen den beiden Elementen befindet. Deshalb ist ein geeignetes Zwischenmedium notwendig, das den Übergang ermöglicht. Um eine verlustarme Kopplung zu gewährleisten, müssen die optischen Eigenschaften des Zwischenmediums an die des Kopplers und der Scheibe bezüglich Brechungsindex und Transmissionseigenschaften angepasst sein. So wird in [68] beispielsweise eine doppelseitig klebende Zwischenschicht vorgestellt, die neben der Erhöhung der optischen Effizienz auch eine mechanische Kopplung ermöglicht. Als mögliche Materialien werden unter anderem Acrylschäume verwendet. Bei der Anbringung des Regensensors an die Windschutzscheibe treten häufig Blasen in dieser Zwischenschicht auf, die die optische Kopplungseffi-

zienz verringern. Als Lösung wird in [69] der Klebeprozess in einer Vakuumkammer vorgeschlagen, der die Bläschenbildung vermeiden soll. Ein weiterer Nachteil von Acrylschaum ist ein auftretender Aushärtprozess bei hohen Temperaturen [70]. Als Problemlösung wird die Verwendung von Silikon-Gelen vorgeschlagen. Neben der hohen Temperaturbeständigkeit bieten diese die Möglichkeit, Farbstoffe aufnehmen zu können. So können die Gele intransparent für sichtbares Licht, gleichzeitig aber transparent für Infrarotstrahlung gefärbt werden. Als Folge wird der Einfluss von Hintergrundlicht reduziert da nur die gewünschte Nutzstrahlung mit definierter Wellenlänge den Detektor erreicht.

Die Reduzierung der Hintergrundstrahlung bleibt dennoch weiterhin eine große Herausforderung für Regensensoren, die auf Totalreflexion an der Außenfläche der Windschutzscheibe basieren. Im Zuge dessen haben sich viele Patentanmeldungen mit dem Ziel der Reduzierung dieser Störeffekte abgeleitet. In [71] wird eine Anpassung der Ein- und Auskoppelprismen präsentiert, die das Auftreffen von Stör- bzw. Hintergrundstrahlung auf der Photodiode verhindern soll. Dazu wird die nach Propagation durch die Scheibe auskoppelnde Strahlung im Koppelement an zwei Außenkanten weiter totalreflektiert und trifft anschließend auf die Photodiode. Diese ist dabei so angeordnet, dass die einfallende Strahlung aus der entgegengesetzten Richtung zur Propagationsrichtung in der Platte eintrifft. Die letzte Grenzfläche des Kopplers dient dabei als Trennfläche zwischen Nutz- und Störstrahlung und ist parallel zur Scheibenoberfläche ausgerichtet. Da die Störstrahlung im Gegensatz zur Nutzstrahlung aufgrund des kleinen Winkelbereichs der Einstrahlung von außen unter deutlich flacheren Winkeln auf die Trennfläche fällt, wird diese dort nicht totalreflektiert und koppelt aus dem Prisma aus. Nachteile der vorgestellten Methode liegen in der Komplexität der Prismen und der hohen notwendigen Baugröße durch den langen Strahlengang im System.

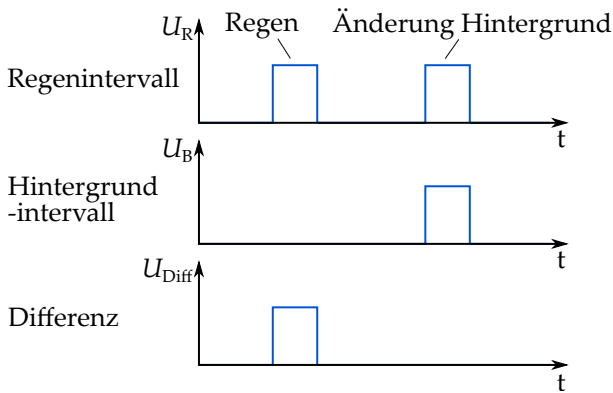


Abbildung 4.3: Eliminierung des Einflusses von Hintergrundlicht durch Differenzbildung zweier Signale. Während im Regenintervall sowohl eintretender Regen als auch Änderungen in der Hintergrundstrahlung registriert werden, ist im Hintergrundintervall nur die Änderung der Hintergrundstrahlung erkennbar. Durch Differenzbildung kann der Einfluss durch die Regentropfen extrahiert werden.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Hintergrundstrahlung durch Differenzbildung zweier Messsignale zu eliminieren [72]. Das Prinzip ist in Abbildung 4.3 gezeigt. In der Regel werden die SendeleDs gepulst betrieben [73], sodass der Regensensor in einer regensensitiven Phase (LED an) und einer hintergrundsensitiven Phase (LED aus) betrieben wird. Setzt Regen ein, so ändert sich das Signal in der regensensitiven Phase U_R (hier Regenintervall), das Signal in der hintergrundsensitiven Phase U_B (Hintergrundintervall) allerdings nicht. Ändert sich spontan die Hintergrundstrahlung zum Beispiel durch Einfahren in einen Tunnel, so ändert sich das Signal sowohl im Regen-, als auch im Hintergrundintervall. Durch Differenzbildung der beiden Signale kann die durch den Regen induzierte Änderung separiert werden. Das Prinzip ist in vielen verschiedenen Möglichkeiten umsetzbar. So können beispielsweise auch mehrere LEDs abwechselnd im Re-

genintervall und im Hintergrundintervall betrieben werden, die auf verschiedenen Pfaden die gleiche Photodiode beleuchten. Die Differenzbildung erfolgt dann durch den Vergleich der zeitlich versetzten Messsignale, sodass der Sensor zu jedem Zeitpunkt regensensitiv geschaltet ist [74, 75].

Neben der Reduzierung des Einflusses von Hintergrundstrahlung existieren viele Ansätze zur Vergrößerung der sensitiven Fläche auf der Außenseite der Windschutzscheibe. In Abbildung 4.2 sind verschiedene Beispiele skizziert, bei denen die Strahlung als einzelner Strahl vereinfacht dargestellt ist. Da eine LED divergentes Licht abstrahlt, kann dieses durch eine Sammellinse wieder kollimiert werden, sodass ein breiteres Strahlenbündel an der Windschutzscheibe reflektiert. Die Breite des Reflexionsbereiches entspricht dann der vergrößerten sensitiven Fläche. Zur Einsparung von Komponenten wird diese Sammellinse direkt in die Prismen zur Kopplung integriert (Abbildung 4.4a) [76]. Die Intensitätsverteilung auf der sensitiven Fläche ist durch die Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle vorgegeben. In [77] wird eine Anpassung des Einkoppelprismas gezeigt, um das kollimierte Licht-

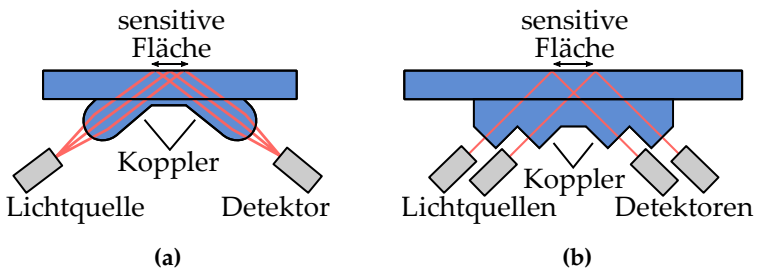


Abbildung 4.4: Erweiterung der sensitiven Fläche eines Regensensors durch Strahlaufweitung mit einer Linse, die direkt in das Einkoppelprisma integriert ist (a) oder durch Verwendung mehrerer Sende- und Empfangskomponenten (b).

bündel stärker zu homogenisieren, damit die Empfindlichkeit auf der sensitiven Fläche gegenüber Wassertropfen ebenfalls homogenisiert wird.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die sensitive Fläche durch Erhöhung der Anzahl an Komponenten zu vergrößern (Abbildung 4.4b). Im gezeigten Beispiel wird sowohl die Anzahl an Lichtquellen als auch die Anzahl an Detektoren gleichermaßen erweitert, sodass die sensitive Fläche um den gleichen Faktor vergrößert wird. Die Verwendung mehrfacher Komponenten ist allerdings mit einem unerwünschten Kostenanstieg des Gesamtsystems verbunden. Durch Anbringung von Linsenstrukturen im Auskoppelprisma kann die Anzahl an Detektoren verringert werden, indem die Strahlenbündel mehrerer Propagationspfade auf dem gleichen Detektor gesammelt werden [78]. Diese Strukturen können gleichermaßen im Einkoppelprisma angebracht werden. Durch den großen Divergenzwinkel von LEDs als Lichtquellen können mehrere, horizontal versetzte Linsen verwendet werden, die mehrere getrennte Strahlenbündel erzeugen [79].

Generell zielt die Entwicklung des Regensensors darauf ab, so wenig Platz wie möglich einzunehmen, damit der Sichtbereich des Fahrers nicht eingeschränkt wird. Deshalb wird der Sensor im oberen Bereich der Windschutzscheibe hinter dem Innenspiegel verbaut [80]. Der Platz ist somit auf diesen Bereich limitiert. Die meisten vorgestellten Systeme zeigen einen linear aufgebauten Regensensor als Strecke zwischen Sende- und Empfangskomponenten. In vielen modernen Regensensoren wird diese Linearität aufgrund der ohnehin vorhandenen Vorgabe der Positionierung auf eine Kreisfläche projiziert [81]. Abbildung 4.5 zeigt den entsprechenden Bereich der Windschutzscheibe in der Draufsicht, hinter dem hier beispielhaft acht Lichtquellen kreisförmig um eine einzelne Photodiode herum angeordnet sind. Die rot gezeichneten Lichtwege stellen den geradlinigen Verlauf in der

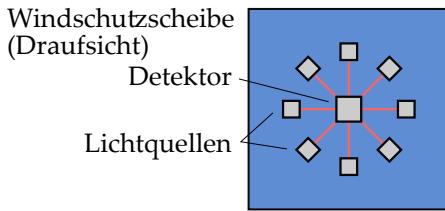


Abbildung 4.5: Ansicht einer möglichen Anordnung von mehreren Lichtquellen (hier: 8) in einem Kreis um einen einzelnen Detektor herum. Die rot dargestellten Lichtwege wirken in der Draufsicht geradlinig, verlaufen aber im Querschnitt mit einer Reflexion an der Oberkante der Windschutzscheibe zwischen den Lichtquellen und dem Detektor.

Draufsicht dar. Im Querschnitt propagiert das Licht analog zu den bisher gezeigten Methoden mit einer Reflexion an der Oberfläche der Windschutzscheibe zwischen Sender und Empfänger. Durch abwechselndes Pulsen der LEDs reicht die einzelne Photodiode aus, um die verschiedenen Signalfade zu erfassen. Die sensitive Fläche kann somit deutlich vergrößert werden, da ein Großteil des Bereiches um die Photodiode herum überwacht werden kann. Die Anordnung erlaubt zusätzlich die zuvor beschriebene Möglichkeit der Differenzbildung aus mehreren Messsignalen, um den Einfluss des Hintergrundlichts zu minimieren [74]. Dabei können verschiedene Pfade zusammengelegt werden, die abwechselnd ein- bzw. ausgeschaltet werden.

In allen bisher gezeigten Verfahren wurde das emittierte Strahlenbündel nach einer einzelnen Reflexion an der Außenseite der Windschutzscheibe wieder ausgekoppelt. Wird das Auskoppelprisma zum Einkoppelprisma weiter versetzt, so kann das Licht an der Innenseite der Windschutzscheibe erneut totalreflektieren, solange das dahinterliegende Medium die Bedingung für Totalreflexion weiterhin erfüllt. Dies ist in jedem Fall gegeben, wenn die beiden Koppler räumlich getrennt werden und im Raum dazwischen nichts an der Scheibe befestigt ist.

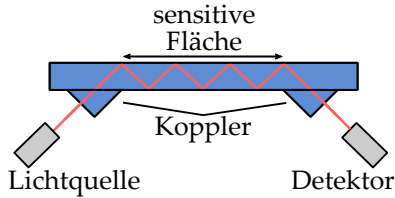


Abbildung 4.6: Erweiterung der sensitiven Fläche durch räumliche Trennung der beiden Koppler. Die Strahlung wird mehrfach innerhalb der Windschutzscheibe totalreflektiert, die dann als Lichtleiter angesehen wird.

Das Strahlenbündel kann dann durch die Scheibe mit mehrfachen internen Totalreflexionen weiter propagieren, bis das Prisma zur Auskoppelung erreicht wird (Abbildung 4.6). Die Windschutzscheibe wird folglich als Lichtleiter für optische Strahlung verwendet. Durch Kratzer oder Verunreinigungen, die direkt in der Scheibe selbst vorhanden sind, sinkt die Leistung mit jeder Totalreflexion an der Scheibe weiter ab. Als Folge werden höhere Strahlungsleistungen benötigt, damit ein hinreichend starkes Signal von der Quelle zum Detektor gelangt. Der zeitliche Verlauf der Oberflächenbenetzung ist nicht von großer Bedeutung, sodass die verwendete Lichtquelle meist gepulst betrieben wird, um hohe Strahlungsleistungen zu erreichen [82]. Da die bereits beschriebene Zwischenschicht zwischen Koppler und Scheibe meist als zusammenhängendes Stück über den gesamten Regensensor an der Scheibe angebracht wird, kann eine stark reflektierende Schicht an der Innenseite verwendet werden, um den Intensitätsverlust an den inneren Reflexionen zu minimieren [83, 84].

INTEGRATION IN LIDAR

Das Prinzip des Regensensors basierend auf internen Totalreflexionen in Windschutzscheiben ist direkt auf die Schutzscheibe von LiDAR-

Sensoren übertragbar. Die Anbringung hinter dem Innenspiegel einer Windschutzscheibe ermöglicht eine Position, die selbst nicht als Sichtfenster dient, sodass die Komponenten die Sicht des Fahrers nicht negativ beeinflussen. Betrachtet man beispielhaft einen rotierenden LiDAR-Scanner, so wird der vollständige Bereich der zylindrischen Schutzscheibe durch die 360° Rotation sende- und/oder empfangsseitig ausgeleuchtet. Somit bleibt keine Stelle für die Anbringung von Komponenten für die Schmutzdetektion erhalten, da diese sonst den Durchlass der LiDAR-Strahlung blockieren. Die Integration eines standardmäßigen Regensensors wie in Abbildung 4.5 ist folglich nicht möglich. Diese Einschränkung wird durch die Verwendung eines Lichtleiter-Regensensors wie in Abbildung 4.6 aufgehoben, wenn die notwendigen Komponenten und Koppelprismen im Randbereich der Schutzscheibe angebracht werden. Bei rotierenden LiDAR-Systemen kann zum Beispiel durch Anbringung der Prismen an der Ober- und Unterkante der zylindrischen Schutzscheibe der vom LiDAR genutzte Bereich überbrückt werden, sodass sich die Komponenten nicht gegenseitig behindern. Lichtleiter-Regensensoren eignen sich somit sehr gut für die Übertragung in LiDAR-Sensoren und werden genauer in Kapitel 4.3 untersucht und experimentell validiert.

4.1.3 ELEKTRONISCHE REGENSENSOREN

Anhaftende Verunreinigungen weisen neben den Änderungen der optischen Eigenschaften des Systems auch Änderungen der elektronischen Eigenschaften auf. Als Folge haben sich weitere Ideen zur Detektion von Verunreinigungen auf Windschutzscheiben abgeleitet, bei denen der Fokus in der Regel auf der Erkennung von Tropfen liegt. Der am meisten verbreitete Ansatz besteht in der Anbringung zweier nahe beieinander liegender, nicht verbundener Leiterbahnen, die

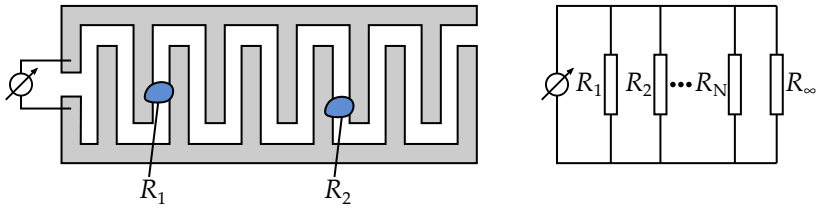


Abbildung 4.7: Anbringung zweier nicht verbundener Leiterbahnen mit Kammstruktur. Durch anhaftende Tropfen werden Kontaktstellen zwischen den Leiterbahnen hergestellt, sodass der Gesamtwiderstand des Systems sinkt. Dieser kann als Parallelschaltung vieler einzelner Widerstände durch die einzelnen Tropfen angesehen werden.

als unendlich großer Widerstand angesehen werden können. Haften hinreichend große Tropfen zwischen den Leiterbahnen an, so wird das System leitfähig und der Gesamtwiderstand ändert sich. Um eine möglichst große sensitive Fläche zu erreichen und gleichzeitig die Regenintensität bewerten zu können, sind die Leiterbahnen kammförmig ausgeprägt und ineinander verschoben (Abbildung 4.7) [85]. Haften nun N Tropfen mit den Widerständen $R_1 \dots R_N$ an unterschiedlichen Positionen an, so ändert sich der Gesamtwiderstand gemäß

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}. \quad (4.1)$$

Mit steigender Regenintensität haften mehr Tropfen auf den Leiterbahnen, sodass der Widerstand des Systems Aufschluss über die Regenintensität liefert [86].

Der zeitliche Verlauf der Widerstandsänderung wird zur Steuerung der Scheibenwischer und zur Einstellung der Wischparameter genutzt. Dabei wird der DC-Anteil, der den aktuellen Benetzungszustand angibt, für die Anpassung der Wischgeschwindigkeit verwendet. Der AC-Anteil beschreibt die zeitliche Änderung durch Auftreffen von Regentropfen (Tropfenfrequenz) und bestimmt die Wischintervalle [87].

Die größte Problematik in der Verwendung resistiver Regensensoren ist die Positionierung des Sensors. In [88] wird der Sensor außerhalb des Fahrzeugs am unteren Ende der Windschutzscheibe angebracht, damit die Sicht des Fahrers nicht eingeschränkt ist. Diese Positionierung ist besonders nachteilig, da die Scheibenwischer die Sensoroberfläche selbst nicht reinigen. Als Folge kann das System auf Änderungen des Wetters nicht unmittelbar reagieren, weshalb beispielsweise der Scheibenwischer bei klaren Sichtverhältnissen durch den noch benetzten Sensor ausgelöst wird. Um die sensitive Fläche mit dem Scheibenwischer reinigen zu können, werden die Leiterbahnen deshalb als dünne Schichten (z.B. Kupfertape) auf einem Bereich der Windschutzscheibe aufgetragen [89, 90]. Der Wischer kann dann direkt über die Leiterbahnen wischen und löst diese nicht unmittelbar ab. Dennoch ist die Aufbringung dieser Leiterbahnen an der äußeren Seite der Windschutzscheibe mit einem hohen Verschleiß verbunden, sodass diese Methode sich nicht flächendeckend durchgesetzt hat.

Ein weiterer Nachteil resistiver Regensensoren besteht darin, dass die Leitfähigkeit von Wassertropfen stark variiert, wenn das Wasser mit anderen Bestandteilen wie Salz versetzt ist [91]. Der Regensensor kann dann bereits bei geringen Wassermengen oder einzelnen Tropfen einen Wischvorgang auslösen. In [91] wird ein weiterer Ansatz vorgeschlagen, bei dem die Scheibenwischer erst bei Überschreiten eines bestimmten Schwellwertes des Benetzungszustandes auslösen. Dazu werden die Leiterbahnen durch eine schachbrettartige Anordnung von zufallsverteilten Leiterstücken ersetzt, die nicht miteinander verbunden sind. Erst durch Anhaften einer gewissen Anzahl an Tropfen wird sukzessive von Leiter zu Leiter der Kontakt zwischen den beiden Endpunkten hergestellt und der Wischvorgang gestartet. Die notwendige Wassermenge hängt von der Verteilung der Leiterstücke ab. Ein Nachteil ist somit, dass der Schwellwert durch die Verteilung vorbestimmt ist und nicht angepasst werden kann.

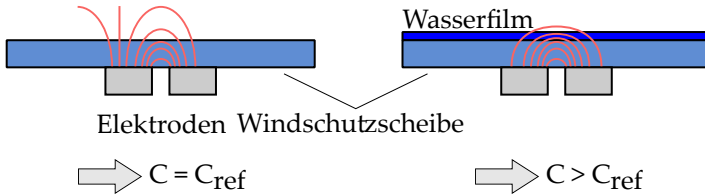


Abbildung 4.8: Anbringung zweier Leiterbahnen als Elektroden auf der Unterseite der Windschutzscheibe. Bei Ablagerung von Feuchtigkeit auf der Oberfläche der Scheibe ändert sich aufgrund der dielektrischen Eigenschaften von Wasser das elektrische Feld und somit auch die Kapazität des Kondensators.

Neben den resistiven Regensensoren sind auch kapazitive Regensensoren bekannt, die ebenfalls als Leiterbahnen in die Windschutzscheibe integriert werden [92]. Der wesentliche Vorteil gegenüber resistiven Verfahren ist, dass die Leiterbahnen auf der Innenseite der Windschutzscheibe angebracht werden können. Die Leiterbahnen stellen Elektroden eines Kondensators dar (Abbildung 4.8), dessen Feldlinien durch die Windschutzscheibe verlaufen. Ist die Oberfläche der Scheibe benetzt, ändert sich die Kapazität des Kondensators durch die dielektrischen Eigenschaften des Wassers. Mit dieser Methode kann ebenfalls durch eine kammartige Struktur der Elektroden eine Abhängigkeit der Kapazität von der Tropfenmenge erreicht werden [93]. Da viele moderne Windschutzscheiben als Verbundgläser aus mehreren Schichten hergestellt werden, werden die Elektroden in der Regel zwischen den Glasschichten angebracht [94]. Die Verteilung der Leiterbahnen kann sich prinzipiell über einen beliebig gewählten Bereich der Windschutzscheibe erstrecken.

Analog zur Änderung der Leitfähigkeit ändert sich auch die Dielektrizitätszahl des Wassers bei Einlagerung von Partikeln. In [95] wird die Änderung der Kapazität eines Sensors mit sehr fein aufgelösten Leiterbahnen untersucht. Durch Einbringung von Schlamm und Lehm in

Wasser kann die Kapazität im untersuchten Konzentrationsbereich bis 20 % Partikelanteil um das sechsfache erhöht werden. Als Folge kann der Sensor möglicherweise den Scheibenwischer auch bei geringeren Wassermengen schon auslösen, wenn hohe Anteile an Fremdpartikeln im Wasser angelagert sind.

Ein weiterer Nachteil kapazitiver Regensensoren liegt in der hohen Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften von Wasser. In [96] wird die Kapazität von kammartigen Regensensoren aus unterschiedlichen Materialien in einem Temperaturbereich von 25 °C bis 70 °C untersucht. Durch Variation der relativen Luftfeuchte von 35 % auf 90 % bei einer konstanten Temperatur von 70 °C steigt die Kapazität um 1,3 % an. Bei Änderung der Temperatur von 25 °C auf 70 °C bei einer konstanten Luftfeuchte von 90 % beträgt der Anstieg hingegen 3,4 %. Der Temperatureinfluss ist somit deutlich größer als der eigentlich relevante Einfluss der Benetzung.

Die hohe Temperaturabhängigkeit wird in [97] durch eine Differenzmessung umgangen. Dazu wird ein System aus drei Elektroden vorgestellt, die zwei Kondensatoren bilden. Die Elektroden sind so verteilt, dass der erste Kondensator durch einen passenden Abstand der Elektroden regensensitiv ist, während der zweite Kondensator durch einen zu kleinen Abstand nicht regensensitiv ist. Die sich ändernde Kapazität bei Temperaturschwankungen wird durch beide Kondensatoren gemessen, sodass eine Differenzbildung den Temperatureinfluss eliminiert. Das gezeigte System konnte allerdings nicht auf ein großflächiges Netz aus Leiterbahnen übertragen werden und wurde nur für einzelne Tropfen evaluiert.

INTEGRATION IN LIDAR

Obwohl elektronische Regensensoren prinzipiell auch als Netz von Leiterbahnen in LiDAR-Sensoren integriert werden können, weisen diese einige Schwierigkeiten auf. Die Anbringung resistiver Sensoren auf der äußeren Scheibenoberfläche ist nahezu auszuschließen. Der hohe Abrieb bei Betätigung der Scheibenwischer wäre ebenso an Schutzscheiben ein zu großes Problem. Kapazitive Sensoren an der Innenseite der Schutzscheibe können prinzipiell über die gesamte Oberfläche verteilt werden. Neben der hohen Temperaturabhängigkeit bringen die Leiterbahnen weitere negative Eigenschaften mit. Selbst bei einer vollständigen Verteilung über die Oberfläche bleibt eine genauere Lokalisierung der Verunreinigungen auszuschließen. Deutlich einschränkender ist die Tatsache, dass die Leiterbahnen selbst nicht transparent für die ausgesendeten und empfangenen IR-Pulse des LiDAR-Sensors sind. Dadurch ändern sich die optischen Eigenschaften der Schutzscheibe, die sowohl zu einer verringerten Transmission, als auch zu Streueffekten führen können.

4.1.4 AKUSTISCHE REGENSENSOREN

Haften Tropfen an der äußeren Fläche von Windschutzscheiben an, so ändern sich mit der Masse und Dicke der Tropfen auch die akustischen Eigenschaften der Scheibe selbst. So wird in [98] ein Ultraschallwandler an der Innenseite der Scheibe befestigt, der Ultraschallpulse sendet, die wiederum an der Außenseite der Scheibe reflektieren. Um eine möglichst hohe Amplitude zu erreichen, wird die Resonanzfrequenz des Wandlers als Vielfaches der Resonanzfrequenz der Scheibe gewählt [99]. Durch Mehrfachreflexionen innerhalb der Scheibe misst der Wandler zeitlich versetzte Pulse mit einer abklingenden Amplitude.

Haften Verunreinigungen wie Wassertropfen an der Windschutzscheibe an, so ändert sich die Dämpfung, sodass die Amplitude der mehrfach reflektierten Pulse stärker abnimmt [100]. Durch die Beurteilung der Dämpfung des empfangenen Signals kann auf die Benetzung zurückgeschlossen werden. Genannte Systeme zeigen allerdings eine hohe Anfälligkeit gegenüber Störsignalen. Entstehende Vibrationen durch den Motor oder durch auffallende Regentropfen können zusätzlich das gemessene Signal beeinflussen. Außerdem zeigt sich eine hohe Temperaturabhängigkeit der Amplitude der ausgesendeten Pulse [100].

Die durch auftreffende Regentropfen erzeugten Störsignale können in einer anderen Art von akustischen Sensoren auch als Nutzsignal angesehen werden. Dazu wird eine Vibrationsplatte außerhalb der Windschutzscheibe angebracht, auf der durch auffallende Tropfen Vibrationen erzeugt werden. Die Anbringung kann beispielsweise unterhalb der Windschutzscheibe in paralleler Ausrichtung dazu erfolgen [101]. An diese Vibrationsplatte wird ein piezoelektrisches Element aufgeklebt, das die Vibrationen in eine Spannung umwandelt (Abbildung 4.9). Für jeden auftreffenden Tropfen wird somit eine Schwingung ausgelöst, die in der Zwischenzeit zwischen den folgenden Tropfen abgebaut wird. Die Amplitude der Schwingung korreliert mit der kinetischen Energie der Tropfen und steigt aufgrund größer werdender Tropfen bei steigender Regenintensität an. Gleichzeitig wird die Frequenz der auftretenden Signale mit stärkerem Regen größer. Ein zentrales Problem dieser Sensoren ist ebenfalls die Empfindlichkeit gegenüber anderer Vibrationen, die beispielsweise durch den Motor oder die Fahrt auf der Straße erzeugt werden. Diese Stör-Vibrationen können teilweise durch geeignete Wahl der Resonanzfrequenz [102] oder durch Anbringung einer Gummischicht im Randbereich unterdrückt werden [103].

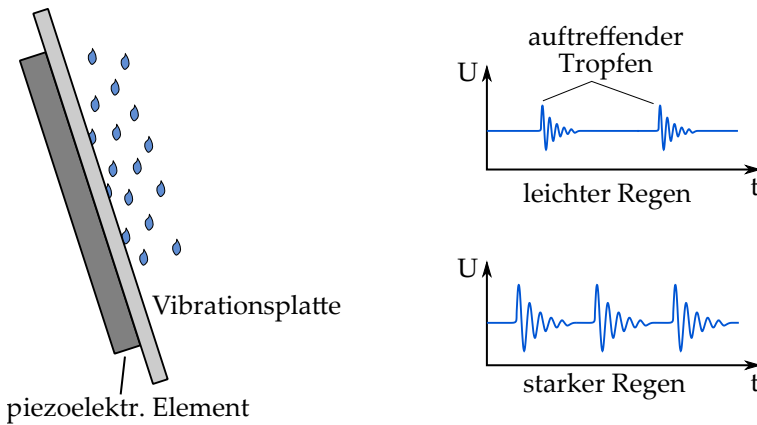


Abbildung 4.9: Anbringung einer Vibrationsplatte außerhalb der Windschutzscheibe am Fahrzeug. Durch Aufkleben eines piezoelektrischen Elements an der Platte können die durch auftreffende Regentropfen erzeugten Vibrationen in ein Spannungssignal umgewandelt werden. Mit steigender Regenintensität steigen sowohl die Amplitude als auch die Frequenz des detektierten Signals an.

Eine Interpretation der Regenintensität mit diesen Systemen ist nur bedingt möglich, da sich bei höherer Fahrtgeschwindigkeit die Auftreffgeschwindigkeit der Tropfen ändert. Die Amplitude der erzeugten Signale ist dann ebenfalls an die Fahrtgeschwindigkeit gekoppelt. Außerdem wird mit dieser Art von Sensoren nur ein kleiner Teilbereich der Scheibe überwacht. Da dieser kleine Teilbereich außerhalb der Scheibe liegt und folglich von der Reinigung nicht erfasst wird, kann die Steuerung der Scheibenwischer nicht problemlos durchgeführt werden. Das Auslösen der Scheibenwischer ist nicht an die Benetzung der Scheibe gekoppelt, sondern ausschließlich an neu auffallende Tropfen. So wird zum Beispiel eine bei dem Start des Fahrzeugs bereits benetzte Scheibe durch das System nicht gereinigt. Eine vollständige Automatisierung eines Reinigungssystems ist daher nicht möglich.

INTEGRATION IN LiDAR

Akustische Sensoren eignen sich aufgrund mehrerer Schwächen nicht für die Integration in LiDAR-Sensoren. Die Anbringung von Ultraschallwandlern direkt an der Schutzscheibe bringt eine erhebliche Einschränkung für die Transmission der LiDAR-Strahlung mit sich. Die alternative Anbringung von Vibrationsplatten außerhalb der Schutzscheibe liefert keine Kenntnis über den tatsächlichen Verschmutzungsgrad der Sensoroberfläche und erfüllt somit nicht die gewünschten Anforderungen. Weiterhin sind die entstehenden Einflüsse durch Störgrößen wie insbesondere die Vibrationen durch den Motor oder auch durch die Fahrt auf der Straße ein wesentlicher Nachteil akustischer Regensensoren.

Die vorgestellten Methoden zeigen verschiedene Vor- und Nachteile, die insbesondere mit Bezug zur Integration in LiDAR-Sensoren betrachtet wurden. Aufgrund zu starker Einschränkung der optischen Eigenschaften der LiDAR-Schutzscheibe werden elektronische und akustische Regensensoren in dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Die optischen Methoden zeigen hingegen mehr Potential und werden in den folgenden Kapiteln durch Testsysteme genauer experimentell validiert.

4.2 LiDAR-DATEN ZUR SCHMUTZDETEKTION

Im vorigen Kapitel wurde bereits anhand hinter dem Rückspiegel verbauter Kamera-Systeme diskutiert, dass die Kenntnis über Verunreinigungen auf der Windschutzscheibe direkt aus dem Kamerabild entnommen werden kann. Analog dazu ist auch bei LiDAR-Sensoren die Überwachung der Schutzscheibe anhand der Interpretation der

LiDAR-Messdaten bevorzugt, um Kosten für zusätzliche Sensorik einzusparen. Grundsätzlich bietet sich auch das zugrundeliegende Sensorprinzip zur Überwachung der Sensorschutzscheibe an. Die vom LiDAR emittierte Strahlung trifft auf anhaftende Partikel oder Tropfen, wird dort reflektiert bzw. gestreut und im zeitlichen Abstand der Schutzscheibe wird ein Puls detektiert, dessen Intensität mit dem Verschmutzungsgrad ansteigt. Zur Überprüfung wird der Nahbereich einer mit einem Velodyne VLP-16 gemessenen Punktwolke betrachtet. Die Betrachtung wird zur besseren Übersicht auf eine einzelne Messebene beschränkt. Abbildung 4.10a zeigt die Messpunkte der Ebene, zugeschnitten auf den Nahbereich im Labor bis maximal 2 m Distanz d in Polarkoordinaten (blau). Dabei werden keine Datenpunkte innerhalb des rot markierten Kreises mit Radius $r = 0,9$ m erkannt. Im Bereich zwischen $120^\circ < \phi < 170^\circ$ befindet sich eine Wand, die bei allen Abständen oberhalb von $d = 0,9$ m detektiert wird, im Nahbereich allerdings nicht. Die Schutzscheibe selbst müsste ebenfalls als Objekt erkannt werden, da trotz der möglichst hohen Transparenz geringe Anteile der Sendestrahlung an der Oberfläche reflektieren. Ein ähnliches Verhalten wurde bereits in Kapitel 3 mit einem Ouster OS-1 Sensor festgestellt. Dort waren alle Messungen unterhalb 3,5 m Distanz fehlerbehaftet und wurden nicht weiter betrachtet.

Die Blindheit des Sensors im Nahbereich folgt aus der Systemauslegung, die für hohe Distanzen optimiert ist. Da die Sensoren meist auf die Erkennung streuender Objekte ausgelegt sind, wird der quadratische Signalverlust eines Lambert-Strahlers in Abbildung 4.10b betrachtet. Die relative Amplitude zeigt das Signal im Abstand d zum Streuobjekt. Der quadratische Zusammenhang sorgt dafür, dass bei sehr geringen Distanzen das Signal um mehrere Größenordnungen ansteigt. Da der Dynamikbereich der zur Messung verwendeten Photodetektoren limitiert ist, wird dieser Bereich auf hohe Distanzen ausgelegt, um die Dynamik nicht für den weniger interessanten Nahbereich

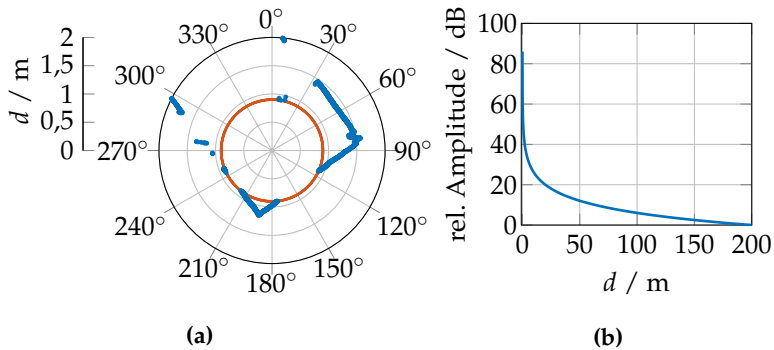


Abbildung 4.10: Einzelne Ebene einer Punktwolke (Velodyne VLP-16) in der Draufsicht im Labor (a). Der Nahbereich unterhalb von 0,9 m Distanz weist keine Objektdaten auf, obwohl sich Objekte in diesem Bereich befinden. Grund dafür ist die Auslegung der Sensordynamik auf hohe Entfernungen, da ansonsten ein Großteil dieser Dynamik für den Nahbereich aufgrund der Lambert'schen Streucharakteristik verwendet wird (b).

zu „verschwinden“. Je nach Einbauposition des Sensors am Fahrzeug ist der Bereich unterhalb 1 m Distanz ohnehin für die Distanzmessung uninteressant. Die Verschiebung des Dynamikbereichs der Detektoren zu großen Entfernungen beziehungsweise kleineren Messsignalen hin sorgt dafür, dass bei der Streuung an Objekten im Nahbereich der Detektor in Sättigung geht. Da beispielsweise auch die Reflexion an der Schutzscheibe zur Sättigung führen kann, ist der Detektor somit auch ohne Umwelteinflüsse blind und kann in einem sensorspezifischen Bereich keine Objekte mehr unterscheiden. Eine Differenzierung zu anhaftenden Partikeln ist deshalb nicht möglich.

Generell ist eine Anpassung der Sensordynamik auf den Nahbereich möglich, sodass gegebenenfalls die Rückstreuung an der Schutzscheibenoberfläche vom Sensor selbst überwacht werden kann. Da dann allerdings die Systemreichweite, die einer der Kernvorteile von LiDAR-

Sensoren ist, stark eingeschränkt ist, ist diese Methodik nicht sinnvoll für die Anwendung im Fahrzeug. Die Untersuchung der Nutzung der LiDAR-Daten zur Schmutzdetektion wird deshalb in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

4.3 INTERNE TOTALREFLEXION UND LICHTLEITUNG

Verschiedene Methoden zur Implementierung von Regensensoren, die auf der internen Totalreflexion optischer Strahlung basieren, wurden bereits in Kapitel 4.1 vorgestellt. Die gezeigten Systeme waren für die Verwendung in Windschutzscheiben vorgesehen. Für die Integration eines solchen Sensors in die Schutzscheibe von LiDAR-Sensoren entstehen teilweise ähnliche, gleichzeitig aber auch weitere Anforderungen. So wird auch hier die Optimierung der sensitiven Fläche von besonderer Wichtigkeit sein. Zusätzlich entstehen andere Anforderungen an die Positionierung des Sensors. An der Windschutzscheibe erfolgt die Anbringung hinter dem Rückspiegel, sodass die Sicht des Fahrers nicht eingeschränkt ist. Ein solcher unkritischer Bereich existiert an der LiDAR-Schutzscheibe nicht, da der Sensor durch die gesamte Sensoroberfläche elektromagnetische Strahlung sendet und empfängt. Die Anbringung von Prismen zur Einkopplung kann deshalb auch nicht an beliebiger Position der Scheibe erfolgen, sondern ist nur im Randbereich möglich. Mit dem Fokus auf rotierende LiDAR-Scanner entspricht dieser Randbereich dem oberen und unteren Ende der zylindrischen Schutzscheibe. Abbildung 4.11 zeigt die Einbringung eines auf Totalreflexion basierenden Schmutzdetektionssystems in einen LiDAR-Sensor mit zylindrischer Schutzscheibe. Während die Sendeeinheit Tx und die Detektionseinheit Rx des LiDARs in eine bestimmte Richtung die Schutzscheibe durchleuchtet, können die Komponenten für die Schmutzdetektion auf der gegenüberliegenden

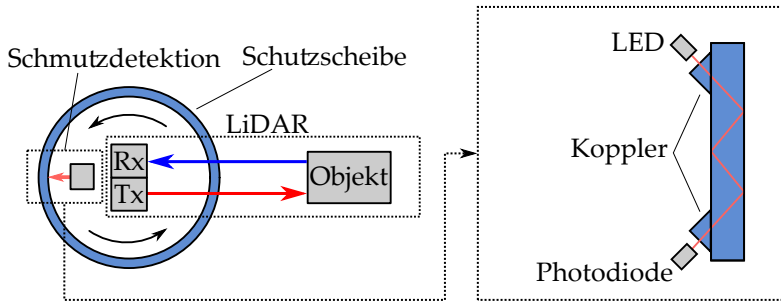


Abbildung 4.11: Integration des Schmutzdetektionssystems in einen rotierenden LiDAR-Scanner mit zylindrischer Schutzscheibe. Im Querschnitt (rechts) ist die Anbringung der Koppelp Prismen an der Ober- bzw. Unterseite der Schutzscheibe gezeigt, sodass der zum Aussenden und Empfangen der Laserpulse genutzte Bereich der Oberfläche nicht beeinflusst wird.

Seite angebracht sein. Dazu müssen die Komponenten zusätzlich an die Sensorrotation gekoppelt werden. Ein daraus resultierender Vorteil ist, dass anders als bei der Überwachung der Windschutzscheibe nicht nur ein Teilbereich, sondern die vollständige Sensoroberfläche betrachtet wird. Die Sensoroberfläche wird dann von der Schmutzdetektionseinheit vollständig gescannt. Der Querschnitt des Bereiches für die Schmutzdetektion ist im Bild rechts gezeigt. Die notwendigen Prismen zur Ein- und Auskopplung können an der oberen bzw. unteren Kante der Schutzscheibe angebracht werden. Damit bleibt der mittlere Teil, der für die Propagation der LiDAR-Infrarotstrahlung genutzt wird, unbeeinflusst. Der Verschmutzungsgrad wird dann entlang der Vertikalen zwischen LED und Photodiode gemessen, während die Rotation für die horizontale Auflösung sorgt.

Ein solches System wird in diesem Kapitel experimentell untersucht. Dabei wird der eigentliche LiDAR-Sensor nicht weiter betrachtet, da die beiden Systeme unabhängig voneinander arbeiten. Abbildung 4.12 zeigt eine Skizze des Aufbaus in der Draufsicht (links) sowie im Quer-

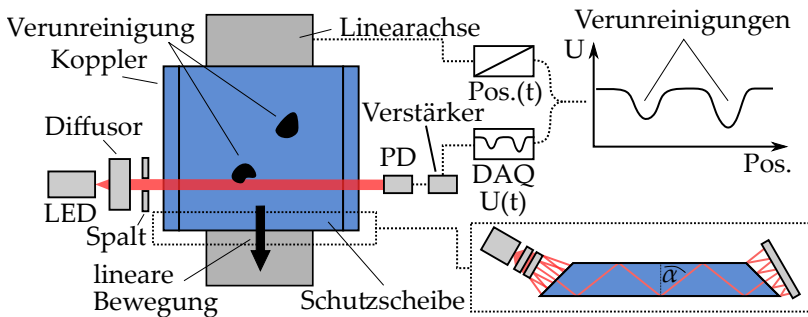


Abbildung 4.12: Skizze des Versuchsaufbaus in der Draufsicht sowie im Querschnitt (unten rechts). Ausgehend von einer Sendeeinheit aus LED, Diffusor und Spaltblende propagiert Licht unter verschiedenen Winkeln durch die Platte, an der die Ein- und Auskopplung durch angeschrägte Kanten realisiert wird. Der an einer Photodiode entstehende Photostrom wird zeitlich erfasst und der momentanen Achsenposition zugeordnet, sodass der Verschmutzungsgrad entlang der Verbindungslinie von LED und Photodiode bestimmt wird. Die Plattenoberfläche wird dann horizontal abgescannt.

schnitt (unten rechts). Dabei wurden verschiedene Änderungen zum rotierenden System vorgenommen. Das zugrundeliegende rotierende System wird durch ein linear bewegliches System ersetzt. Statt einer zylindrischen Schutzscheibe wird eine Platte aus PMMA mit Dimensionen von 20 cm x 10 cm x 3 mm gewählt. Diese Platte ist auf einer Linearachse mit einem Stellweg von bis zu 20 cm befestigt. Alle weiteren Komponenten sind fest, sodass der Scan hier nicht durch bewegliche Komponenten, sondern durch eine bewegliche Schutzscheibe erreicht wird. Alle entstehenden Ergebnisse sind aber vollständig auf ein rotierendes System übertragbar. In Kapitel 4.1.2 wurde bereits beschrieben, dass die sensitive Fläche durch Aufweitung des Strahlenbündels hinter der LED vergrößert werden kann. Als Beispiel wurde die divergente Lichtverteilung einer LED mit einer Sammellinse kollimiert. Alternativ wird hier ein Diffusor nach der LED verwendet, um

die Lichtverteilung bezüglich der Propagationswinkel in der Platte zu homogenisieren. Gegenüber eines kollimierten Strahlenbündels entstehen somit keine toten Bereiche, an denen keine Reflexionen an der Oberfläche stattfinden. Der Diffusor bewirkt zur gewünschten vertikalen ebenfalls eine horizontale Divergenz. Diese soll verhindert werden, um die Entstehung von Streustrahlung innerhalb der Platte zu minimieren. Dazu wird eine Spaltblende hinter dem Diffusor platziert. Die Ein- und Auskopplung wird in diesem Versuchsaufbau durch Anschrägen der beiden Kanten auf dem Propagationspfad um 45° realisiert. Der Querschnitt (unten rechts) zeigt die Positionierung der Sende- und Empfangskomponenten zu den schrägen Kanten der Platte. Das Licht kann dann, hier beispielhaft dargestellt durch einen einzelnen Strahl mit Propagationswinkel α , mit mehrfachen internen Totalreflexionen durch die Platte propagieren. Nach Auskopplung an der Endkante der Platte trifft die Strahlung auf eine Photodiode (PD) und erzeugt dort einen Photostrom proportional zur Intensität. Der Strom wird mit einem Transimpedanzverstärker in eine Spannung umgewandelt und mit einer Datenerfassungskarte (NI USB-6216 von National Instruments, 16 bit, 400 kS/s) zeitlich erfasst. Bei Bewegung der Linearachse wird neben der Erfassung des Signals der Photodiode zeitgleich die aktuelle Achsenposition ausgelesen, sodass beide Signale softwareseitig zusammengefügt werden können. Die Zuordnung der gemessenen Spannung zur aktuellen Achsenposition zeigt dann die Positionen an, an denen Verunreinigungen auf der Platte vorhanden sind. Die Position beschreibt lediglich den Verschmutzungsgrad entlang der momentanen Verbindungslinie zwischen LED und Photodiode auf der Plattenoberfläche. Eine Zuordnung der Verunreinigungen bezüglich der Position auf dieser Verbindungslinie ist im beschriebenen System nicht möglich.

Das Testsystem im Labor ist in Abbildung 4.13 gezeigt. Als Lichtquelle wird eine LED (Thorlabs M590L3) bei 590 nm mit einer Strah-

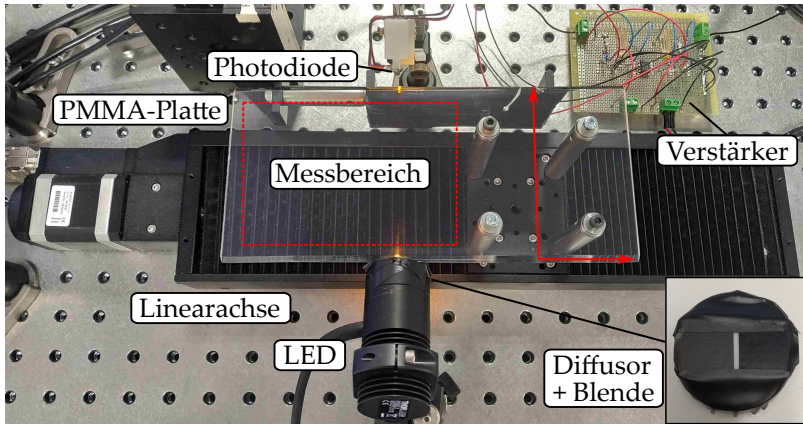


Abbildung 4.13: Aufbau des Messsystems im Labor. Die Platte aus PMMA ist oberhalb der Linearachse befestigt, sodass die Bewegung der Platte entlang der feststehenden Komponenten den Scan realisiert. Der rot markierte Bereich zeigt den Messbereich, auf dem die Verunreinigungen in den folgenden Messungen platziert werden.

lungsleistung von 170 mW und einem vollen Öffnungswinkel von 80° verwendet. Die Wahl einer Lichtquelle im sichtbaren Spektralbereich erfolgt ausschließlich für die Laboranwendung. Für eine Integration in LiDAR-Sensoren ist das Prinzip vollständig auf andere Wellenlängen übertragbar. Da die LED nahezu als Punktquelle abstrahlt wird nach dieser ein Diffusor mit Lambert'scher Abstrahlcharakteristik (Edmund Optics, broadband hybrid diffuser #36-613) verwendet, der als Aneinanderreihung vieler einzelner Punktquellen entlang der Eintrittsfläche der Platte angesehen werden kann und somit die Lichtverteilung in der Platte homogenisiert. Die darauffolgende Spaltblende zur Unterdrückung der horizontalen Divergenz wird durch Aufkleben von schwarzem Klebeband auf den Diffusor realisiert (Bild unten rechts). Die PMMA-Platte ist mit vertikalen Abstandshaltern an der Linearachse befestigt, sodass der Bereich der Befestigung nicht zur Messung

genutzt werden kann. Der rot markierte Bereich entspricht dem Messbereich, auf dem die Verunreinigungen platziert werden. Entlang des Messbereichs wird bei fester Achsenposition nur der direkte Verbindungsweg von LED bzw. Diffusor und Photodiode gemessen. Die erreichbare horizontale Positionsauflösung hängt dann mit der Breite der Spaltblende und der Breite der Photodiode zusammen. Um diese zu maximieren, wird eine möglichst schmale Photodiode benötigt. Gleichzeitig muss die Photodiode die gesamte aus der Platte austretende Strahlung detektieren. Bei einer Plattendicke von 3 mm und 45° schrägen Kanten folgt eine vertikale Länge der Austrittsfacette von 4,24 mm. Dadurch wird die minimale Länge der Photodiode definiert, die notwendig ist, um die divergent austretende Lichtverteilung vollständig zu erfassen. Da die Photodiode nicht unmittelbar an die Endfacette platziert werden kann, muss die Photodiode abhängig von der Winkelverteilung in der Platte und dem Abstand zur Endfacette gewählt werden. In dieser Arbeit wird eine Photodiode (Hamamatsu S2387-16R) mit einer Breite der aktiven Fläche von 1,1 mm und einer Länge von 5,9 mm verwendet (Abbildung 4.14). Der erzeugte Photostrom I_{PD} wird mit dem gezeigten Transimpedanzverstärker um

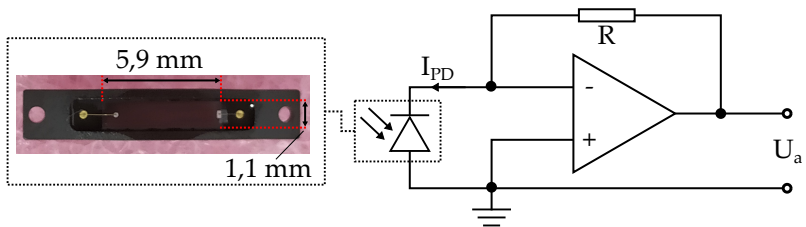


Abbildung 4.14: Verwendete Photodiode (Hamamatsu S2387-16R) mit einer aktiven Fläche von 5,9 mm x 1,1 mm und zugehöriger Transimpedanzverstärker zur Umwandlung des erzeugten Photostroms I_{PD} in eine Ausgangsspannung U_a , die dann von der Datenerfassungskarte gemessen wird. Durch Veränderung von R kann die Verstärkung angepasst werden.

den Faktor des Widerstandes R verstärkt und in eine Ausgangsspannung U_a umgewandelt. Zur einfachen Anpassung der Verstärkung wird hier ein Potentiometer in Reihe mit einem weiteren Widerstand geschaltet, um Verstärkungen im Bereich von $360 \pm 200 \text{ kV A}^{-1}$ zu ermöglichen. Damit kann die Ausgangsspannung an den Messbereich der Datenerfassungskarte ($0 - 10 \text{ V}$) angepasst werden, damit die Spannungsauflösung voll ausgenutzt werden kann.

Das vorgestellte System wird in einem ersten Schritt anhand einer einfachen Testmessungen mit einer zufälligen Verteilung einzelner Wassertropfen auf der Platte getestet (Abbildung 4.15). In der gegebenen Darstellung ist die Platte in der Draufsicht um 90° gegenüber des Versuchsaufbaus in Abbildung 4.13 gedreht. Die beiden roten Pfeile

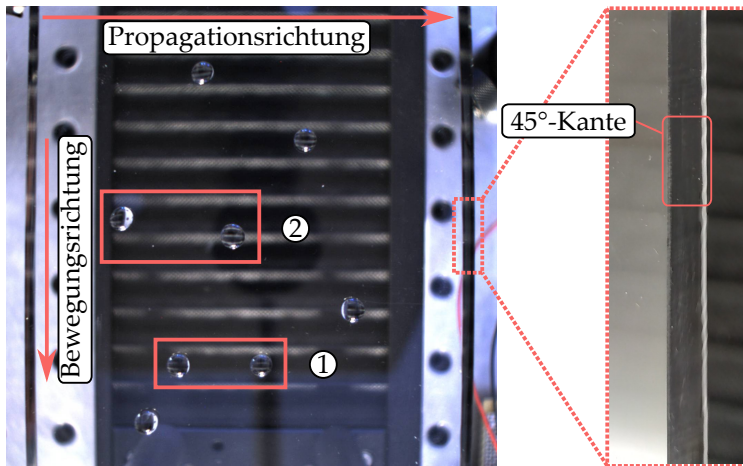


Abbildung 4.15: Verteilung von Wassertropfen auf der Platte mit Bewegungsrichtung entlang der Vertikalen. Die beiden markierten Bereiche unterscheiden sich von den einzelnen Tropfen durch eine höhere Benetzung entlang der horizontalen Propagationsrichtung. Die beiden um 45° schrägen Außenkanten weisen Unebenheiten auf, die in der Vergrößerung rechts im Bild zu erkennen sind.

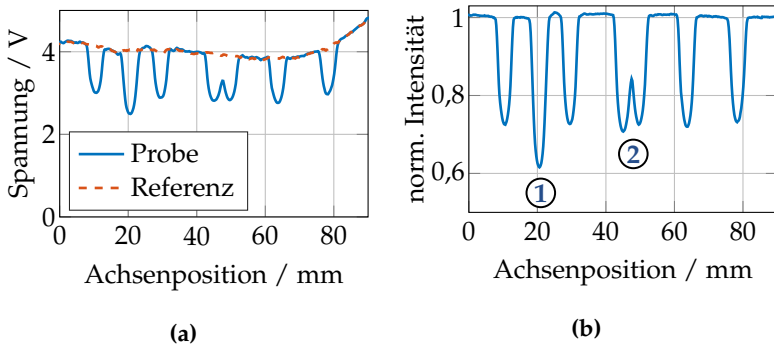


Abbildung 4.16: Gemessene Spannung für eine saubere Platte (rot) und nach Auftragen der Wassertropfen (blau) in (a). Aufgrund von Ungenauigkeiten der schrägen Plattenkanten wird das Signal mit der Referenz normiert (b). An den Positionen entlang der Bewegungsrichtung, an denen Tropfen auf der Platte haften, sinkt die Intensität sprunghaft ab. Die beiden markierten Bereiche aus Abbildung 4.15 bewirken einen stärkeren Intensitätsverlust (1) im Vergleich zu einzelnen Tropfen sowie eine Überlappung der Einbrüche bei nahe beieinander liegenden Tropfen (2).

geben sowohl die Bewegungsrichtung der Platte als auch die Propagationsrichtung des Lichts durch die Platte an. Die beiden schrägen Außenkanten der Platte zur Kopplung (linke und rechte Seite) erscheinen in der Draufsicht dunkel und definieren den gesamten Propagationpfad in der Platte von 10 cm. Die zugehörige Spannungsmessung über einen linearen Bereich von 90 mm ist in Abbildung 4.16a für die Bewegung einer sauberen Platte (rot gestrichelt) und für die Bewegung der Platte aus Abbildung 4.15 mit den platzierten Tropfen (blau) gezeigt. An den Positionen entlang der Bewegungsrichtung (x -Achse), an denen Tropfen auf der Platte vorhanden sind, sinkt die gemessene Spannung aufgrund der Auskopplung eines Teils der Strahlung an den Tropfen. In einem verlustfreien System sollte die Referenzspannung einen konstanten Wert über die gesamte Plattenbewegung anzeigen. Die

Abweichungen entstehen durch Ungenauigkeiten der schrägen Kanten für die Ein- und Auskopplung, die in der Vergrößerung in Abbildung 4.15 gezeigt sind. Zusätzlich ist ein Anstieg des Referenzsignals im Randbereich (80 – 90 mm) zu erkennen. Dieser Bereich entspricht der linken Außenkante der Platte (vergleiche Abbildung 4.13). Da die Spaltblende die horizontale Divergenz nur bedingt unterdrückt, wird ein Teil der schräg innerhalb der Platte propagierenden Strahlung an der Außenkante reflektiert und erreicht die Photodiode. Dieser Effekt wird stärker, je mehr sich der Propagationsspfad der Plattenkante nähert. Bei Übertragung des Systems auf rotierende LiDAR-Sensoren mit zylindrischer Schutzscheibe tritt der Effekt aufgrund der fehlenden Kanten nicht auf. In den folgenden Messungen, die alle mit planaren Platten durchgeführt wurden, wird stattdessen das gemessene Signal bei anhaftenden Verunreinigungen mit dem Referenzsignal normiert (Abbildung 4.16b). Das Ergebnis ist als normierte Intensität angegeben und beschreibt direkt den entstehenden Verlust nach der Propagation durch die Platte. An jeder Position, an der Tropfen auf der Platte anhaften, sinkt das gemessene Signal ab und erzeugt einen Einbruch, dessen Amplitude mit der Wassermenge verknüpft ist. Im markierten Bereich (1) fällt das Signal stärker ab, da dort zwei Tropfen hintereinander auf dem gleichen Propagationsspfad liegen. Die Intensität ist also mit der Ausdehnung der Tropfen entlang der Propagationsrichtung verknüpft. Die Ausdehnung in die dazu senkrechte Richtung bewirkt eine Veränderung der Breite der Einbrüche. Im markierten Bereich (2) sind zwei Tropfen nur leicht zueinander versetzt, sodass sich diese im Bezug zur Positionierung entlang der Bewegungsrichtung der Platte teilweise überlagern. Im Signal entstehen dann auch zwei überlagerte Einbrüche, die nicht voneinander getrennt werden können.

4.3.1 INTERPRETATION DES VERSCHMUTZUNGSGRADES

Der Verschmutzungsgrad entlang der Bewegungsrichtung der Platte bzw. entlang der Rotation eines LiDAR-Sensors dient der Identifikation stark verschmutzter Bereiche, die in der Interpretation der Punktwolke berücksichtigt werden kann. Zusätzlich wird die Information genutzt, um die Wischintervalle des Scheibenwischers zu regeln. Der Verschmutzungsgrad ist damit von besonderer Bedeutung und wird nun anhand von Wassertropfen genauer untersucht und später auf weitere Verunreinigungen erweitert.

Zur Ermittlung des Verschmutzungsgrades werden verschiedene Tropfenverteilungen entlang der Propagationsrichtung platziert, die sich in der Anzahl an Tropfen und des Tropfenvolumens unterscheiden. Die zu untersuchenden Tropfenvolumina von 1 μl , 2 μl , 5 μl und 10 μl werden jeweils mit einer Mikropipette aufgetragen. In jeder Messung wird der Reihe nach die Tropfenanzahl von einem einzelnen Tropfen bis zu maximal sechs Tropfen gleichen Volumens variiert. Diese Tropfenreihen werden in der Bewegungsrichtung versetzt platziert, sodass sich die Tropfenanzahl entlang der Propagationsrichtung beim Scan über die Platte verändert. Vor jeder Messung wird die Platte gereinigt und eine Referenzmessung aufgenommen, sodass nur noch die bereits normierten Ergebnisse gezeigt werden. Für ein Tropfenvolumen von 5 μl ist das resultierende, normierte Signal in Abbildung 4.17a dargestellt. Erkennbar sind sechs aufeinanderfolgende Signaleinbrüche mit steigender Amplitude, die der jeweiligen Tropfenanzahl von eins bis sechs zugeordnet werden können. Mit steigender Anzahl an Tropfen sinkt das Signal stark ab. Die Änderung des Verlustes verringert sich allerdings bei größerer Benetzung und nähert sich einer unteren Grenze an. Für jede Konstellation an Tropfenverteilungen wird das Minimum, das dem mittleren Schnitt durch die Tropfen entspricht, ausgelesen. Dieser Vorgang wird für alle vier unterschiedlichen Tropfengrößen

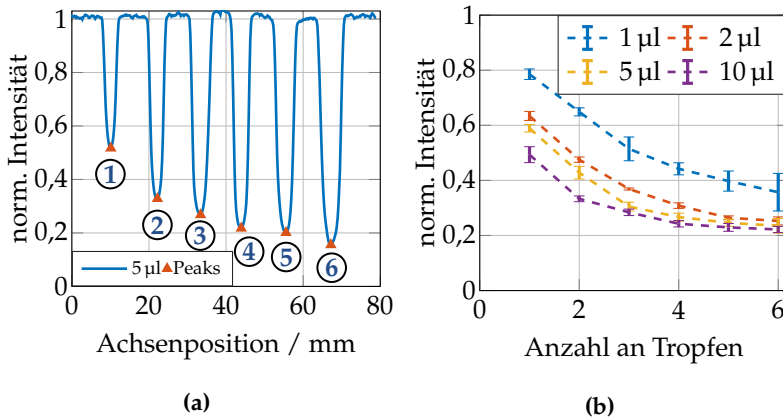


Abbildung 4.17: Intensitätsverlauf bei Erhöhung der Tropfenanzahl von einem einzelnen Tropfen bis zu sechs Tropfen mit $V = 5 \mu\text{l}$ entlang der Propagationsrichtung (a). Die Amplituden der Einbrüche für unterschiedliche Tropfenvolumina (b) zeigen einen zu Beginn schnell wachsenden Verlust, der sich mit erhöhter Tropfenanzahl einem konstanten Wert nähert. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte aus fünf Messungen mit der Standardabweichung als Fehlerbalken.

jeweils fünf mal durchgeführt. Die resultierenden Amplituden, die den maximalen Verlust beschreiben, sind in Abbildung 4.17b in Abhängigkeit der Anzahl an Tropfen für alle Tropfenvolumina gezeigt. Die Fehlerbalken geben jeweils die Standardabweichung über fünf Messungen an. Für einzelne Tropfen mit $V = 1 \mu\text{l}$ beträgt der Verlust 21 % und steigt auf 51 % bei Tropfen mit $V = 10 \mu\text{l}$ an. Für alle Volumina ist der zu Beginn steile Signalverlust erkennbar, der sich einem konstanten Wert bei ungefähr 75 % Verlust annähert. Bei den kleinsten Tropfen ($V = 1 \mu\text{l}$) ist dieser Wert nach sechs Tropfen noch nicht erreicht. Die aus den fünf Messungen resultierende Standardabweichung bei $V = 1 \mu\text{l}$ steigt mit der Anzahl an platzierten Tropfen von $\sigma = 0,02$ auf $\sigma = 0,07$ im Vergleich zu einer mittleren Standard-

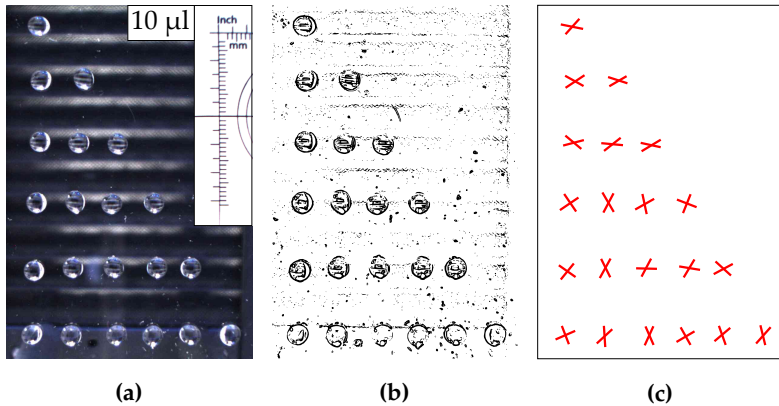


Abbildung 4.18: Aufgetragene Tropfen auf der Platte in (a). Durch Anwendung einer Kantendetektion (b) können die Durchmesser der Tropfen ausgelesen werden (c). Die aufliegende Skala in (a) erlaubt eine Rückrechnung der tatsächlichen Tropfendurchmesser.

abweichung der Ergebnisse bei Tropfenvolumina von $V = 2 - 10 \mu\text{l}$ mit $\sigma = 0,01$ stark an. Der hohe Unterschied der Standardabweichung resultiert aus einer ungenauen Platzierung der Tropfen. Diese Ungenauigkeit wird bei kleineren Tropfen deutlich größer, da ein leichter seitlicher Versatz zur Propagationsrichtung einen größeren Einfluss hat.

Relevant für die Auskopplung an den Tropfen ist in erster Linie nicht das Volumen der Tropfen, sondern die Länge der Grenzfläche der Benetzung. Der Verschmutzungsgrad selbst hängt nur von der Benetzung entlang der Propagationsrichtung ab, sodass eine Beurteilung der Tropfendurchmesser notwendig ist. Diese wiederum hängen von den Benetzungseigenschaften der Platte ab. Bei der Platzierung der Tropfen ist bereits aufgefallen, dass die Benetzung nicht immer vollständig reproduziert werden konnte. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse wird der Tropfendurchmesser deshalb statistisch ausge-

Tabelle 4.1: Ermittelte mittlere Durchmesser der Tropfen an der Grenzfläche zur Platte mit zugehöriger Standardabweichung σ .

Volumen / μl	Durchmesser / mm	σ / mm
1	2,28	0,14
2	3,66	0,19
5	4,19	0,27
10	4,78	0,18

wertet. Dazu wird eine Skala neben den Tropfen direkt auf die Platte platziert, sodass diese in der Bildebene der Kamera liegt, die von oben auf die Tropfen scharfgestellt ist. Für eine der Tropfenverteilungen mit $V = 10 \mu\text{l}$ ist das Kamerabild in Abbildung 4.18a gezeigt. Mit Hilfe der Skala kann der im Bild ermittelte Tropfendurchmesser in den tatsächlichen Durchmesser ohne Vergrößerung zurückgerechnet werden. Da die Kanten der Tropfen schwierig zu erfassen sind, wird zuerst eine Kantendetektion nach dem Canny-Algorithmus durchgeführt, der die Helligkeitsschwankungen benachbarter Pixel vergleicht [104]. Das resultierende Bild zeigt Abbildung 4.18b, in dem der Hintergrund größtenteils nicht mehr sichtbar ist. Da sich die unterhalb der Tropfen sichtbaren Lamellen der Linearachse in den Tropfen widerspiegeln, werden diese ebenfalls als Kanten im Tropfeninneren erkannt. Die Durchmesser werden händisch an den Stellen eingezeichnet, an denen die Kanten gut erkennbar sind. Um die teils leicht elliptische Form der Tropfen zu berücksichtigen werden jeweils zwei Schnittwerte gemessen (Abbildung 4.18c). Somit werden für jedes untersuchte Tropfenvolumen 42 Durchmesser ausgelesen und gemittelt. Die mittleren Tropfendurchmesser und die Standardabweichung sind in Tabelle 4.1 gezeigt.

Der in Abbildung 4.17b gezeigte Intensitätsverlust kann mit den Werten aus Tabelle 4.1 der Gesamtlänge der Benetzung entlang der Pro-

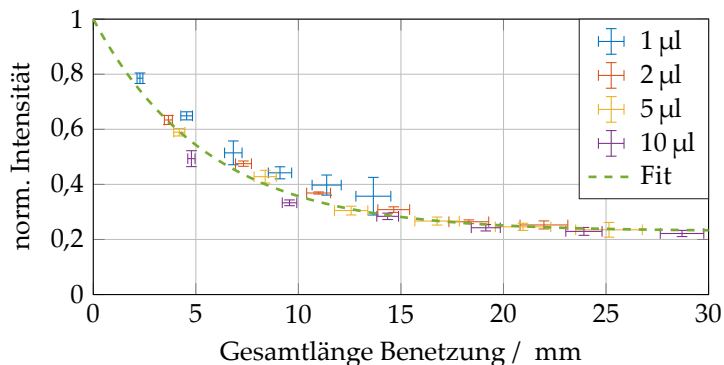


Abbildung 4.19: Normierte Intensität in Abhängigkeit der gesamten Länge der Benetzung in Propagationsrichtung. Der Verlauf wird durch eine exponentielle Dämpfung mit Offset I_{\min} gefittet.

pagationsrichtung zugeordnet werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.19 für alle Tropfenvolumina gezeigt. Die horizontalen Fehlerbalken entsprechen der ermittelten Standardabweichung, die mit der Tropfenanzahl multipliziert wird. Erkennbar ist ein nahezu gleich fallender Verlauf für alle Tropfenvolumina, der sich einem konstanten Wert (Offset) annähert. Dieser Offset folgt unmittelbar aus den Reflexionsbedingungen an der Grenzfläche der Platte zu den anhaftenden Materialien. Propagiert die Strahlung durch die Platte, werden alle Strahlen mit Propagationswinkel oberhalb des Grenzwinkels der Totalreflexion

$$\alpha_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_a}{n_p} \right) \quad (4.2)$$

totalreflektiert. Die beiden Brechungsindizes entsprechen dem Brechungsindex der Platte $n_p = 1,49$ (bei 590 nm [105]) und dem des äußeren Mediums n_a . Der Vergleich einer unbenetzten Platte mit $n_a = n_{\text{Luft}} = 1$ mit anhaftenden Wassertropfen $n_a = n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,33$

(bei 590 nm [106]) definiert den Winkelbereich in der Platte, der an den Wassertropfen auskoppelt und den Verlust erzeugt mit

$$\sin^{-1} \left(\frac{n_{\text{Luft}}}{n_{\text{p}}} \right) = 42,1^\circ \leq \alpha \leq 63,2^\circ = \sin^{-1} \left(\frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{p}}} \right). \quad (4.3)$$

Durch den Diffusor vor der Einkoppelfacetten wird allerdings ein großer Winkelbereich aufgespannt, aus dem auch Strahlen mit Propagationswinkeln oberhalb $\alpha_{\text{c,H}_2\text{O}} = 63,2^\circ$ in der Platte resultieren. Dieser Lichtanteil wird auch bei Vorhandensein von Wasser totalreflektiert und bleibt selbst bei vollständiger Benetzung in der Platte. Für andere Verunreinigungen mit größeren Brechungsindizes kann das Licht auch bis zu einem vollständigen Verlust auskoppeln. Wie groß der Offset ist, hängt von dem erzeugten Winkelbereich sowie von der Positionierung der Photodiode ab. Im gezeigten Fall lässt sich die normierte Intensität I_{n} in Abhängigkeit von der Benetzung mit Gesamtlänge x gut durch eine exponentielle Dämpfung ähnlich zum Lambert-Beer'schen Absorptionsgesetz beschreiben durch

$$I_{\text{n}} = (1 - I_{\text{min}}) \exp(-cx) + I_{\text{min}}, \quad (4.4)$$

die um den Offset I_{min} erweitert wurde. Die Größe c beschreibt die Dämpfung des Systems in m^{-1} . Für die generierten Daten in Abbildung 4.19 wird Gleichung (4.4) als Fitfunktion angewendet. Durch die bereits festgestellten hohen Abweichungen bei $V = 1 \mu\text{l}$ werden diese Daten aus dem Fit weggelassen. Der Offset des Systems beträgt dann $I_{\text{min}} = 0,23 = 23\%$ mit einer Dämpfungskonstante $c = 0,18 \text{ mm}^{-1}$ (grün gestrichelt in Abbildung 4.19).

Das System zeigt einen definierten Zusammenhang des Verlustes durch anhaftende Tropfen in Abhängigkeit der Benetzung. Die Information des Verschmutzungsgrades kann sehr gut für die Anpassung der Wischintervalle eines Scheibenwischers genutzt werden. Zusätzlich wird der Verschmutzungsgrad in horizontaler Richtung über die

gesamte Schutzscheibe bestimmt. Für eine mögliche Anwendung in realen Bedingungen sind noch weitere Untersuchungen interessant. Im nächsten Schritt wird die Übertragung auf andere Verunreinigungen wie Salz oder Staub überprüft, die sich aus der Umgebung auf der Schutzscheibe niederlassen können.

4.3.2 REALE BEDINGUNGEN

Die bisher gezeigten Messungen waren auf eine genaue Positionierung einzelner Tropfen beschränkt, um den Verschmutzungsgrad interpretieren zu können. Die Positionierung entspricht allerdings nicht real auftretenden Bedingungen, denen sich in diesem Abschnitt weiter angenähert werden soll. Dazu werden die Verunreinigungen nicht gezielt platziert, sondern analog zu den erstellten Verschmutzungsproben in Kapitel 3 aufgesprüht. Zusätzlich wird das System auch mit weiteren in der Realität auftretende Proben wie Staub und Salz neben den bisher untersuchten Wassertropfen getestet.

Zuerst wird die Untersuchung durch Aufsprühen von Wasser zur Simulation von Regen erweitert. Das Wasser wird oberhalb der Platte indirekt auf die Platte gesprüht, sodass sich keine großen Wasseransammlungen aus vielen kleinen Tropfen bilden. Die drei erstellten Wasserproben sind in Abbildung 4.20 (a-c) in dem untersuchten Bereich von 10 cm x 10 cm gezeigt. Unterhalb der transparenten Platte wurde zur besseren Sichtbarkeit ein schwarzer Hintergrund platziert. Für jede der dargestellten Proben wurde eine Messung inklusive Normierung analog zu den vorher beschriebenen Herangehensweise durchgeführt. Die Vertikale entspricht hier der Bewegungsrichtung der Achse und die Horizontale der Propagationsrichtung des Lichts (von links nach rechts). Abbildung 4.20d zeigt die jeweiligen Messungen der drei Wasserproben. Die erste Probe (H_2O 1, blau) weist

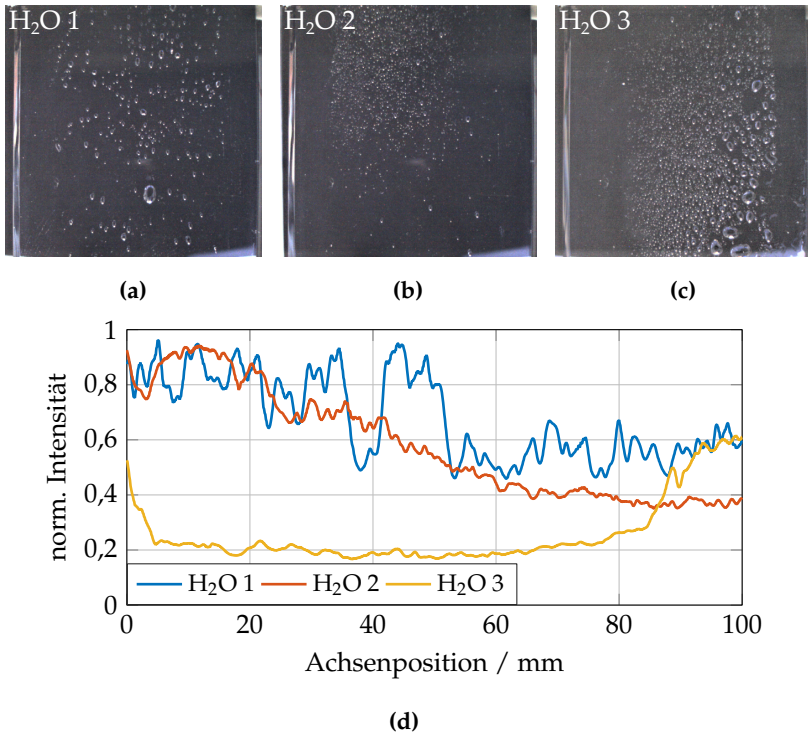


Abbildung 4.20: Erstellte Proben mit unterschiedlichen Verteilung an Wassertropfen (a-c) mit Propagationsrichtung (von links nach rechts) und Bewegungsrichtung der Platte (nach unten). Die zugehörige Messung (normiert mit Referenz) beschreibt den durch die Tropfen induzierten Signalverlust (d).

eine leichte Verteilung an Tropfen über den gesamten Messbereich auf, die in schwankenden Verlusten von ca. 20 % bis 50 % resultiert. Dabei sind einzelne signifikante Variationen wie der große Tropfen im unteren Bereich des Bildes im Signal überlagert zum Gesamtverlust zu erkennen (ca. an Pos. 40 mm). Auf der Oberfläche der zweiten Probe (H₂O 2, rot) ist eine Verteilung vieler kleiner Tropfen gezeigt, deren Häufigkeit zum oberen Ende der Platte hin zunimmt, sodass der Ver-

lust bis zu 60 % ansteigt. Für beide Proben spiegelt der Signalverlauf die sichtbare Verteilung auf der Platte wider. Bei einer sehr hohen Benetzung (H_2O 3, gelb) sind keine Ausschläge im Signal sichtbar. Der Verlust liegt nahezu konstant bei ca. 80 % (bzw. $I = 0,2$) und steigt aufgrund des zuvor beschriebenen Offsets nicht weiter an. Der durch einzelne große Tropfen entstehende Verlust (wie beispielsweise die großen Tropfen unten rechts) ist dann nicht mehr zu erkennen.

Neben der Ansammlung von Wassertropfen führen auch anlagernde feste Partikel wie Staub oder Salz zu einer verringerten Transmission durch die Schutzscheibe und damit auch zu einer Abnahme der Systemreichweite (vergleiche Kapitel 3). Die Ablagerung der Partikel erfolgt nicht wie bei Wasser in Form großer Tropfen, sondern verteilt sich meist über die gesamte Oberfläche der Schutzscheibe. Analog zur Herstellung der Verschmutzungsproben in Kapitel 3 werden Verunreinigungen in Form einer Lösung in Wasser auf die Platte aufgesprüht. Um die Vereinigung vieler kleiner Tropfen zu größeren zu vermeiden und eine homogene Verteilung zu erreichen, werden die Verschmutzungslösungen schichtweise aufgetragen. Nach Verdampfen des beigemischten Wassers entstehen die in Abbildung 4.21 (a-d) dargestellten Verteilungen an Staub (Arizona dust A.2 fine) bzw. Salz (Kochsalzlösung). In Abbildung 4.21e sind die zugehörige normierte Intensität entlang der Bewegungsrichtung der Achse (vertikal) gezeigt. Für die beiden nur leicht verschmutzten Proben (Staub 1 und NaCl 1) sinkt die Intensität auf Werte zwischen 80 % und 90 % über den gesamten Messbereich. Der Verlauf selbst weist aufgrund der homogenen Verteilung der Partikel nur geringe Schwankungen auf. Durch Auftragen weiterer Verschmutzungsschichten sinkt die Intensität weiter bis zu einem maximalen Verlust von ca. 50 % für die Proben Staub 2 und NaCl 2. Die Schwankungen entlang der Achsenposition werden mit steigendem Verschmutzungsgrad ebenfalls größer und liegen zwischen 50 % und 80 %.

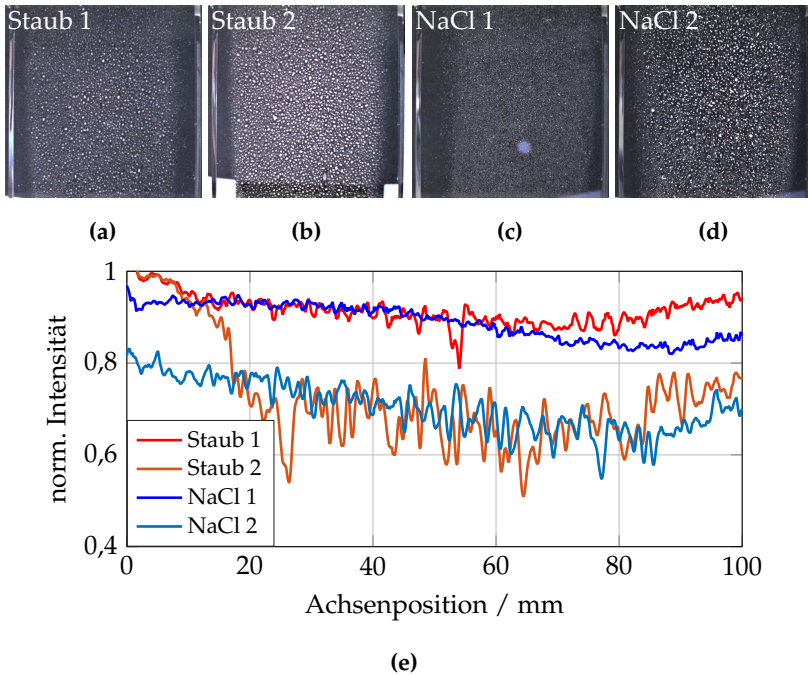


Abbildung 4.21: Erstellte Staub- und Salzproben durch schichtweise Auftragen einer Lösung mit Wasser (a-d). Die normierte Intensität in (e) beschreibt die Intensität nach Propagation durch die Horizontale in Abhängigkeit der Achsenposition (Vertikale).

Der Verlustanteil nach Propagation durch die Platte hängt vom Brechungsindex der anhaftenden Materialien sowie der gesamten Grenzfläche ab. In Tabelle 4.2 sind die Brechungsindizes von Kochsalz sowie der Hauptbestandteile des verwendeten Normstaubs angegeben. Da alle Brechungsindizes oberhalb des Brechungsindex von PMMA mit $n_p = 1,49$ liegen, findet keine Totalreflexion statt. Der im vorigen Abschnitt beschriebene Offset entsteht somit nicht bei Anlagerung von Staub und Salz. Der durch Staub oder Salz induzierte Verlust ist dennoch meist geringer als der Verlust bei vergleichba-

Tabelle 4.2: Brechungsindex verschiedener Verunreinigungen bei 590 nm. Für doppelbrechende Materialien sind je der ordentliche und der außerordentliche Anteil angegeben.

Material	Brechungsindex n
NaCl	1,54 [107]
Staub	
SiO ₂	1,54/1,55 [108]
Al ₂ O ₃	1,75/1,73 [109]
Fe ₂ O ₃	3,31/2,93 [109]

rer Wassermenge. Die Ursache liegt in den Anhaftbedingungen der Partikel beziehungsweise Tropfen an der Oberfläche der Platte. Zur Veranschaulichung ist die Ansammlung einzelner Staubpartikel (hier in Form von Kugeln) im Vergleich zu Wassertropfen in Abbildung 4.22 dargestellt. Während einzelne feste Staub- oder Salzpartikel aufgrund ihrer Form nur eine geringe Kontaktfläche mit der Platte bilden, ist diese bei der Benetzung von Wassertropfen durch die Formung von Kugelkappen wesentlich größer. Zwischen den festen Partikeln treffen Strahlen innerhalb der Platte auf die Grenzfläche PMMA-Luft und koppeln nicht aus der Platte aus. Nur die Anteile, die direkt auf die Grenzfläche treffen, können in die Partikel einkoppeln. Innerhalb der Partikelansammlung reflektiert die Strahlung aufgrund der vielen aufeinanderfolgenden Grenzflächen in verschiedene Richtungen, sodass die Verschmutzung zu einer Streuung des Verlustanteils nach außen führt. Die Auskopplung an Wassertropfen hingegen ist durch die definierte Brechung an den Grenzflächen PMMA-Wasser sowie Wasser-Luft gerichtet. Die hergestellten Staub- und Salzproben zeigen eine homogene Verteilung größerer Zusammenschlüsse von Partikeln, da die Auftragung in Form kleiner Wassertropfen erfolgte. In der Realität lagern sich die Partikel auch als Aerosole in der Luft auf der

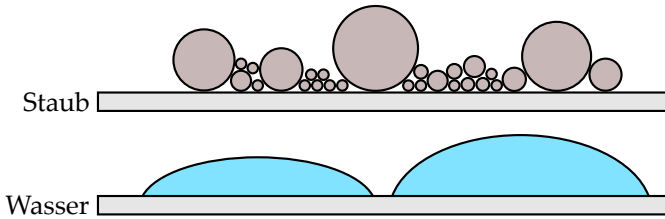


Abbildung 4.22: Anlagerung einzelner Staubpartikel im Vergleich zur Benetzung von Wassertropfen an der Plattenoberfläche.

Platte an, sodass die entstehende Verteilung flächendeckender wird. Die Verluste können dann die hier gezeigten Proben mit 50 % Verlust überschreiten.

Die Detektion von Verunreinigungen auf LiDAR-Sensoren durch Nutzung der Schutzscheibe als Lichtleiter wurden in diesem Kapitel ausführlich evaluiert. Der aus dem Stand der Technik bekannte TIR-Regensensor wurde um eine horizontale Bewegung entlang der Schutzscheibe erweitert. Das Messergebnis ist dann kein einzelner Wert, sondern eine Beschreibung des Verschmutzungsgrades entlang der gesamten Oberfläche der Schutzscheibe. Der Verschmutzungsgrad V kann anschaulich als Verlust nach Propagation durch die Platte interpretiert werden als Differenz einer sauberen Platte und des gemessenen Restsignals I_n

$$V = 1 - I_n. \quad (4.5)$$

Für die gezeigten Ergebnisse bei Benetzung von Wassertropfen in Abbildung 4.20 ist der Verlust auf der Plattenoberfläche in Abbildung 4.23 dargestellt. Der Farbplot beschreibt den Verschmutzungsgrad auf der gesamten untersuchten Plattenoberfläche. Da die Platte in vertikaler Richtung verfährt, kann der Verschmutzungsgrad in horizontaler Richtung nicht unterschieden werden. Die Bewegung in einem rotierenden LiDAR-Sensor erfolgt entlang der Rotationsachse, sodass

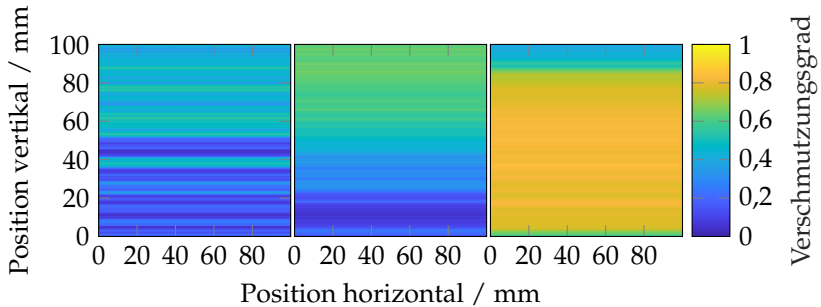


Abbildung 4.23: Verschmutzungsgrad V auf der gesamten Oberfläche der in Abbildung 4.20 gezeigten Verteilungen von Wassertropfen. Dieser erlaubt eine Identifikation stark verschmutzter Bereiche zur besseren Interpretation der LiDAR-Daten.

die Verschmutzungsgrad für jeden Rotationswinkel angegeben werden kann. Neben der gezielten Reinigung und der Anpassung der Reinigungsparameter wird hier die Möglichkeit zur intelligenten Interpretation der LiDAR-Messdaten deutlich. Die Ortsauflösung erlaubt eine Identifikation stark verschmutzter Bereiche, die zu einer Abschwächungen der Sende- und Empfangsleistung führen und damit möglicherweise in diesen Richtungen befindliche Objekte nicht erkannt werden. So können, je nach Festlegung des Schwellwertes, beispielsweise für die mittlere Probe die Daten im unteren Bereich als sicher interpretiert werden, während im oberen Bereich aufgrund der starken Verschmutzung die Messdaten anderer Sensoren genutzt werden müssen.

TIR-Regensensoren zeigen somit großes Potential für die Verwendung zur Schmutzdetektion in LiDAR-Systemen. Im nächsten Kapitel wird ein ähnlicher Testaufbau für die Untersuchung rückstreubasierter Methoden vorgestellt, bevor die einzelnen Techniken im letzten Abschnitt miteinander verglichen werden.

4.4 RÜCKSTREUBASIERTE METHODEN

In Abschnitt 4.1.1 wurde bereits die Erkennung von Verunreinigungen durch die Verwendung von ADAS Kameras hinter der Windschutzscheibe vorgestellt. Für die Nutzung in LiDAR-Sensoren zur Schmutzdetektion müssten allerdings sowohl der Kamera-Chip als auch ein Objektiv zusätzlich integriert werden. Da damit auch die Gesamtsystemkosten deutlich ansteigen, wird dieses Konzept hier nicht weiter verfolgt. Das physikalisch zugrundeliegende Prinzip basiert auf der Messung zurückgestreuter Strahlung an den Verunreinigungen. Alternativ zum vollständigen Kamera-Modul kann das Streulicht auch mit einzelnen Photodioden gemessen werden, sodass die Systemkosten gering bleiben. Dazu werden in diesem Kapitel einige Testmessungen vorgestellt, um das Potential zu validieren.

Abbildung 4.24 zeigt eine Möglichkeit, das System in einen LiDAR-Sensor zu integrieren. Ähnlich zu dem gezeigten TIR-System in Kapitel 4.3 kann das rückstreubasierte Messsystem in rotierenden LiDAR-Scannern auf der Rückseite angebracht werden, damit die beiden Systeme sich nicht gegenseitig beeinflussen. Durch die Kopplung der Messung an die Rotation kann analog eine horizontale Ortsauflösung erzeugt werden. Mit einer zusätzlichen Lichtquelle (hier eine Laserdiode (LD)) wird ein vertikaler Ausschnitt der Schutzscheibe durchleuchtet. Anhaftende Schmutzpartikel oder Tropfen auf der Außenseite streuen die Strahlung in verschiedene Raumrichtungen, insbesondere auch zurück in Richtung der Lichtquelle. Zu dieser versetzt werden Photodioden angebracht, die den Streuanteil messen.

Zur Vereinfachung wird analog zu der Herangehensweise in Abschnitt 4.3 die Sensorrotation durch eine lineare Bewegung einer planaren Schutzscheibe ersetzt. Dazu wird eine 15 cm x 10 cm x 3 mm große Polycarbonat-Platte vertikal auf einer Linearachse befestigt,

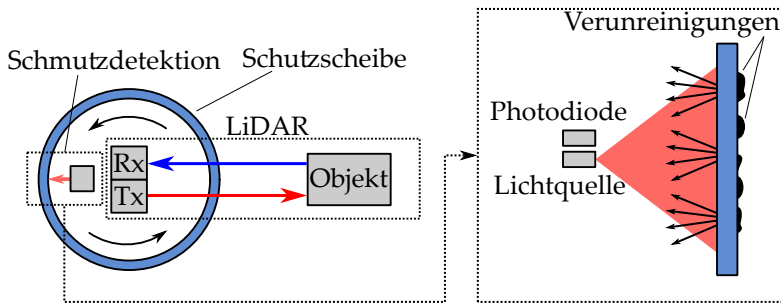


Abbildung 4.24: Integration des Schmutzdetektionssystems in einen rotierenden LiDAR-Scanner mit zylindrischer Schutzscheibe. Im Querschnitt (rechts) ist die Anbringung einer zusätzlichen Lichtquelle gezeigt, die den untersuchten Bereich der Schutzscheibe beleuchtet. Der zurückgestreute Lichtanteil wird durch Photodioden (PD) gemessen.

sodass diese entlang der horizontalen, längeren Kante gescannt wird. Eine Skizze des Laborsystems ist in Abbildung 4.25 in der Frontalansicht gezeigt. Die Platte wird hier mit einer Laserdiode mit einem linienförmigen Strahlprofil beleuchtet. Der beleuchtete Bereich entspricht an jeder Plattenposition genau dem Bereich, der aktuell auf Verunreinigungen überwacht wird. Alternativ zur linienförmigen Beleuchtung kann auch die gesamte Platte simultan beleuchtet werden. Die horizontale Ortsauflösung ist dann nicht mehr möglich, allerdings wird auch kein linearer Scan benötigt. Da der Fokus hier auf die Anwendung in rotierenden LiDAR-Scannern liegt, wird die Rotation (bzw. hier die lineare Bewegung) aber genutzt, da die Ortsauflösung wesentliche Vorteile liefert. Die Messung erfolgt analog zu der gezeigten Herangehensweise im vorherigen Kapitel durch Verstärkung des Photodiodensignals und anschließender Datenerfassung. Die gemessene Spannung wird nach der Bewegung der Platte den einzelnen Positionen zugeordnet. Bei sauberer Platte wird eine konstante Spannung aufgrund von Hintergrundstrahlung gemessen. Haften Ver-

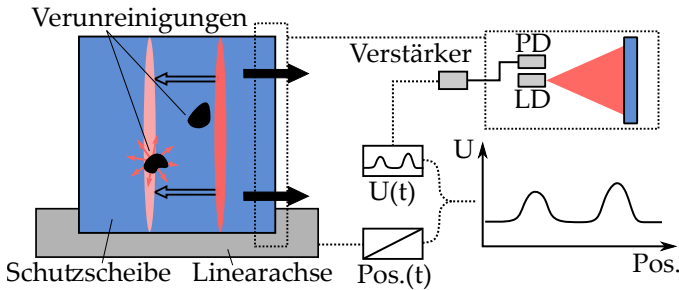


Abbildung 4.25: Messprinzip in der Frontalansicht. Statt einer Systemrotation wird eine PC-Platte linear bewegt. Während der Bewegung wird die Platte linienförmig durchleuchtet. Haften Verunreinigungen an, wird an den entsprechenden Positionen eine erhöhte Rückstreuung gemessen, über die Rückschlüsse auf den Verschmutzungszustand getroffen werden können.

unreinigungen an, so steigt die Spannung an diesen Positionen an. Der erwartete Verlauf ist somit genau umgekehrt zu der Verlustmessung im Falle eines TIR-basierten Systems zur Schmutzdetektion.

Die Auswahl und Anordnung der Komponenten ist in Abbildung 4.26 gezeigt. Die Platte wird mit einer Laserdiode (Picotronic L635-5-3(9x26)60-F1000, 635 nm, 5 mW cw) durchleuchtet, die eine linienförmige Ausbreitung mit einem Öffnungswinkel von 60° erzeugt. Zur weiteren Homogenisierung der Intensitätsverteilung des Strahlprofils wird zusätzlich ein Diffusor (Thorlabs ED1-L4100) direkt hinter der Laserdiode platziert (Bild rechts). Durch das Verfahren der Linearachse erfolgt die Plattenbewegung, während alle weiteren Komponenten fixiert bleiben. Zum Test der optimalen Positionierung der Photodioden werden drei Photodioden mit einem Abstand von 2,5 cm vertikal versetzt angeordnet. PD1 bezeichnet hier die untere Photodiode, PD2 die mittlere auf gleicher Höhe mit dem Diffusor und PD3 die obere. Zusätzlich sind die Photodioden horizontal um 2 cm zur Laserdiode versetzt, um die Messung der direkten Reflexion an der Platte zu

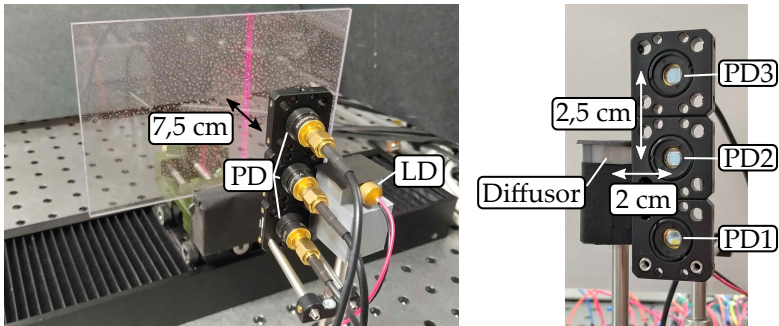


Abbildung 4.26: Aufbau des Messsystems im Labor. Die rote Linie definiert den Messbereich, der sich durch die lineare Bewegung der Platte horizontal verschiebt. Rechts ist die Anordnung der Photodioden (PD) und der Lichtquelle aus Laserdiode (LD) und Diffusor gezeigt.

vermeiden. Um einen möglichst großen Anteil des von den Verunreinigungen ausgehenden Streulichtes messen zu können, werden Photodioden mit einer großen aktiven Fläche (Thorlabs SM05PD1A (FDS100), 3,6 mm x 3,6 mm) verwendet, die mit einer Verstärkung von 2 MV A^{-1} an die Datenerfassungskarte (NI USB-6216 von National Instruments, 16 bit, 400 kS/s) angeschlossen sind.

Für die ersten Testmessungen werden Verteilungen von Wassertropfen gezielt auf der Platte platziert, um Aussagen zum Positionseinfluss der Tropfen oder auch dem Verschmutzungsgrad treffen zu können. Eine Betrachtung realer Verschmutzungsverteilungen erfolgt im Anschluss daran in Abschnitt 4.4.1. Zuerst werden einzelne Tropfen diagonal auf der Platte verteilt, die horizontal gescannt wird (grau hinterlegt in Abbildung 4.27). Danach werden sukzessive weitere Reihen diagonal verteilter Tropfen unterhalb hinzugefügt, sodass mit 1-5 Tropfen untereinander jeweils eine Messung durchgeführt wird, um den Einfluss der Tropfenanzahl bzw. des Verschmutzungsgrades zu untersuchen.

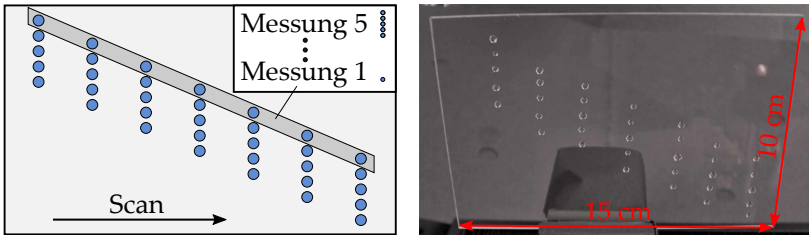


Abbildung 4.27: Verteilung der Tropfen auf der Platte. Die Tropfen sind diagonal zueinander versetzt. Vor jeder Messung wird die Anzahl an Tropfen sukzessive um einen bis zu einem Maximum von fünf vertikal versetzten Tropfen erhöht.

In der Durchführung der Messung fährt die Linearachse einen Stellweg von 20 cm. Für die Darstellung werden die Daten auf den interessanten Messbereich der Platte (15 cm) zugeschnitten. Vor Auftragen der Tropfen wird eine Referenzmessung durchgeführt, die das Hintergrundrauschen (ca. 3 mV) bestimmt, das anschließend vom Messsignal subtrahiert wird. Abbildung 4.28a zeigt die gemessene Spannung für die Grenzfälle von einzelnen Tropfen (a) und von fünf Tropfen untereinander (b) mit allen Photodioden. Im Falle einzelner Tropfen (a) entstehen an den Tropfenpositionen einzelne Ausschläge mit stark schwankenden Amplituden bis maximal 10 mV. Von den erwarteten sieben Ausschlägen sind insbesondere für die äußeren Photodioden (PD1 und PD3) nicht alle Tropfen erkennbar. Durch die Erweiterung auf jeweils fünf untereinander platzierte Tropfen steigt die Spannung für alle Photodioden an (b). Gleichzeitig wird hierbei der Positionseinfluss verdeutlicht. In der Messung mit der oberen Photodiode (PD3) sind insbesondere auch die oberen Tropfenreihen erkennbar, in der Messung mit der unteren Photodiode (PD1) die unteren Tropfen. Nur mit der mittleren Photodiode (PD2) sind alle sieben Tropfenreihen erkennbar, sodass sich die Platzierung der Pho-

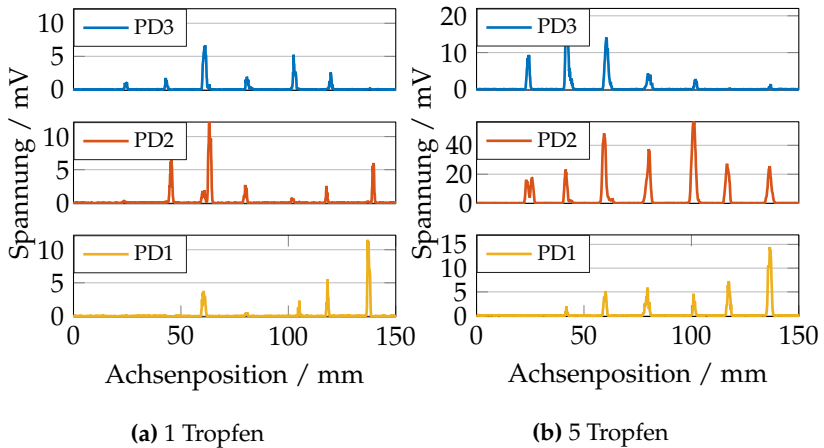


Abbildung 4.28: Messung des zurückgestreuten Signals mit den drei vertikal versetzten Photodioden PD1-PD3 (von oben nach unten) für jeweils diagonal verteilte Tropfenreihen einzelner Tropfen (a) und fünf Tropfen (b). Die Streusignale variieren bei einzelnen Tropfen deutlich, die Empfindlichkeit ist somit positionsabhängig. Bei größeren Tropfenmengen (b) erkennt nur die mittlere Photodiode (PD2) alle unterschiedlich positionierten Tropfen.

todiode auf Höhe der Lichtquelle für weitere Experimente anbietet. Die Amplituden steigen hier auf ca. $40 \text{ mV} \leq U \leq 60 \text{ mV}$ für die drei mittleren Tropfenreihen an und fallen im Randbereich auf ca. 20 mV ab. Das Empfangssignal hängt somit sehr stark von der Position der Verunreinigungen ab. Der Zusammenhang folgt unmittelbar aus der Entfernung der Verschmutzungsposition zur Photodiode. Durch den kleineren Raumwinkel von der Streuquelle (Verschmutzungspartikel bzw. Tropfen) zur Photodiode sinkt mit größerem Abstand entlang der Vertikalen die Strahlungsleistung ab, sodass das System in der Mitte eine höhere Empfindlichkeit aufweist.

Im nächsten Schritt soll der Einfluss des Verschmutzungsgrades untersucht werden. Da nur mit der mittleren Photodiode (PD2) alle

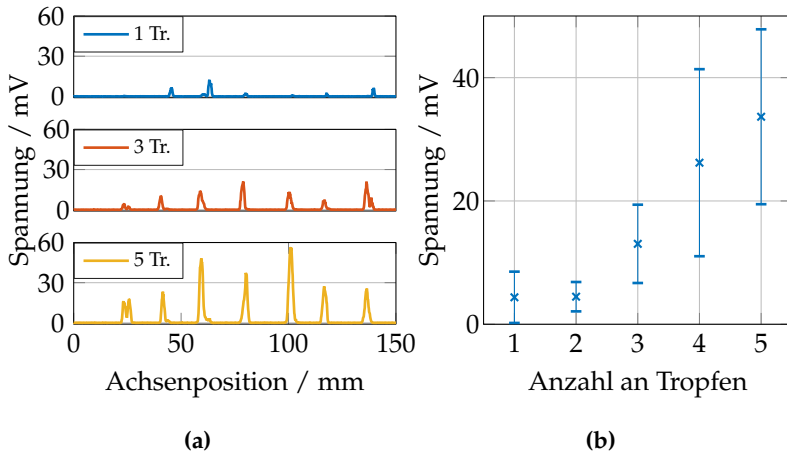


Abbildung 4.29: Gemessene Spannung (PD2) in Abhängigkeit der Tropfenanzahl, hier dargestellt für einen, drei und fünf Tropfen (a). Der Anstieg der Signalamplituden wird durch Auslesen der Maxima an jeder der sieben möglichen Positionen für alle fünf Messungen untersucht. Dieser Anstieg ist in Abhängigkeit der Tropfenanzahl klar zu erkennen, aber mit einer sehr großen Ungenauigkeit überlagert (b).

Verunreinigungen erkennbar waren, wird die weitere Untersuchung auf diese einzelne Photodiode beschränkt. Dazu werden alle vorherigen Messungen der Tropfenverteilungen (je 1-5 untereinander) betrachtet. Für jede der fünf durchgeführten Messungen entsteht ein Signal mit maximal sieben erkennbaren Ausschlägen. Abbildung 4.29a zeigt beispielhaft die gemessene Spannung für einen, drei und fünf Tropfen übereinander. Man beachte hier die Skalierung der Spannungsskala, sodass direkt der Anstieg mit höherer Tropfenanzahl erkennbar ist. Für jede der fünf Messungen wird an jeder der sieben möglichen Positionen der Maximalwert ausgelesen. Anschließend werden die jeweils sieben resultierenden Maximalwerte gemittelt und in Abbildung 4.29b in Abhängigkeit der Tropfenanzahl dargestellt.

Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an. Insgesamt steigt die Spannung mit der Anzahl an Tropfen an. Eine quantitative Untersuchung des Anstiegs wird aufgrund der ungenauen Positionierung nicht durchgeführt. Das Messsignal zeigt somit wie zu erwarten eine starke Abhängigkeit von dem Verschmutzungsgrad. Die hohe Standardabweichung (und somit die hohen Fehlerbalken) resultieren sowohl aus dem bereits gezeigten Positionseinfluss als auch von der grundsätzlich sehr unterschiedlichen Rückstreuung verschiedener Tropfen. Da die Rückstreuung durch Mehrfachreflexe innerhalb des Tropfens entsteht, wirkt sich eine veränderte Tropfenform stark auf die Rückstreuecharakteristik aus. Eine genauere Untersuchung wird hier nicht durchgeführt. Man beachte hier zusätzlich, dass bei geringer Verschmutzung nur ein geringes Messsignal (hier $< 10 \text{ mV}$) empfangen wird. Für die Messung wurde außerdem das Messlabor nahezu vollständig abgedunkelt, um die sehr geringeren Streusignale vom Rauschen unterscheiden zu können. Da dennoch ein Rauschlevel von ca. 3 mV gemessen wurde, ist das System sehr anfällig gegenüber Hintergrundlicht.

Grundsätzlich skaliert das durch die Rückstreuung induzierte Messsignal mit dem Verschmutzungsgrad. Die gezielte Anbringung der einzelnen Tropfen stellt allerdings ein unwahrscheinliches Szenario dar. Für die Anwendung im Fahrzeug sind größtenteils Tropfenverteilungen bei Regen oder auch Verteilungen anhaftender Staubpartikel zu erwarten, die im nächsten Abschnitt untersucht werden.

4.4.1 REALE BEDINGUNGEN

Die gezielte Platzierung einzelner Tropfen eignet sich zur Untersuchung des Verschmutzungsgrades, repräsentiert aber keine in der Realität auftretende Verteilung von Wassertropfen bei Regen. Des-

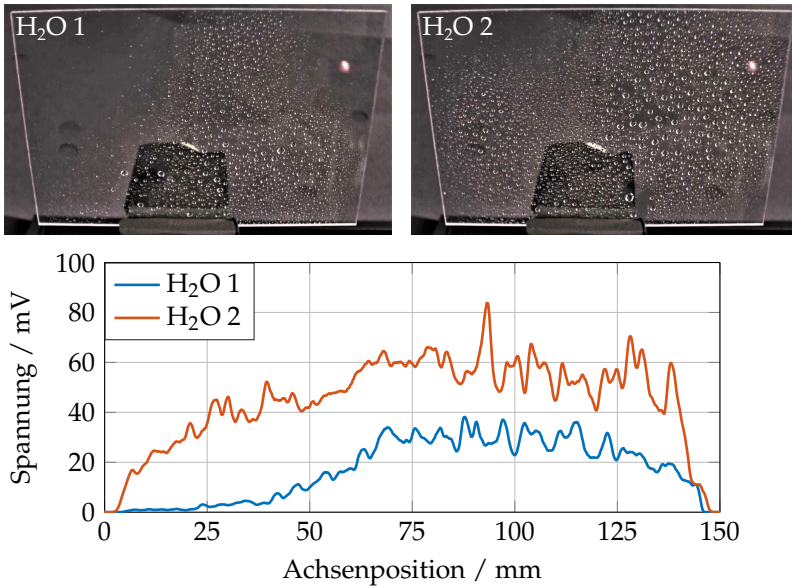


Abbildung 4.30: Rückstreuung durch anhaftende, zufällig verteilte Wassertropfen. Auf der ersten Probe (H₂O 1) haften nur wenige Tropfen im linken Plattenbereich an, sodass dort auch eine geringe Spannung im zurückgestreuten Signal gemessen wird. Die zweite Probe (H₂O 2) zeigt die maximal mögliche Benetzung, die im gegebenen Aufbau zu einer maximalen Spannung von 84 mV führt.

halb werden in diesem Abschnitt, analog zu der Herangehensweise in den Testmessungen zum TIR-basierten Regensensor (Abschnitt 4.3), Testmessungen mit zufallsverteilten Wasser- und Staubanlagerungen durchgeführt, um realen Bedingungen näherzukommen.

Die Wassertropfen werden mit einer Sprühflasche direkt auf die Platte aufgesprüht. Abbildung 4.30 zeigt zwei unterschiedliche Messungen (H₂O 1 in blau und H₂O 2 in rot). Beide Messungen zeigen eine zur Plattenmitte hin ansteigende Spannung, die nach außen (Plattenrand)

auf Null abfällt. In den jeweiligen Proben ist eine ähnliche Tropfenverteilung erkennbar. Durch das direkte Besprühen des mittleren Plattenbereiches lagern sich größere Tropfen hauptsächlich in der Mitte der Platte an, während zum Plattenrand hin nur kleinere Tropfen sichtbar sind. Insbesondere bei der ersten Probe (H_2O 1) lagern sich aufgrund der Sprühhichtung von der Seite aus nur im rechten Bereich Tropfen an, sodass das Messsignal auch nur in diesem Bereich ansteigt. Der gemessene Verlauf stellt sehr gut die sichtbare Verteilung auf der Probe nach. Probe H_2O 2 zeigt die maximale mögliche Benetzung der Platte, die zu einer Spannung von bis zu 84 mV führt. Für den gegebenen Aufbau sind somit keine Spannungen oberhalb 84 mV bei Messungen mit Wasser zu erwarten. Die insgesamt deutlich stärkere Benetzung der zweiten Probe ist sowohl im Foto als auch im Messsignal sichtbar. Bei konstantem Hintergrundlicht kann das System somit gut für die Interpretation der Benetzung durch Wassertropfen entlang der Bewegungsrichtung genutzt werden.

Aufgrund der Größe im Millimeterbereich ist die Rückstreuung durch mehrfache Totalreflexionen innerhalb der nahezu hemisphärischen Wassertropfen gerichtet und stark von der Tropfenform abhängig. Eine sich auf der Platte anlagernde Partikelschicht hingegen weist eine sehr diffuse Streucharakteristik auf, die nach der Mie-Theorie von der Partikelgröße abhängig ist. Die Testmessungen in dieser Arbeit werden auf Proben aus Staub (Arizona dust A.2 fine) beschränkt. Diese werden wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben in einer Wasserlösung schichtweise aufgesprüht. Nach jeder Schicht wird gewartet, bis das Wasser verdampft ist und nur die festen Partikel übrig bleiben. Im Anschluss daran wird eine Messung durchgeführt, bevor die nächste Schicht aufgesprüht wird. In Abbildung 4.31 ist das Messsignal für 2-8 aufgetragene Schichten zusammen mit einer beispielhaften Messung einer aufgesprühten Lösung dargestellt, bevor diese verdampft ist (gestrichelt). Im Bild oben ist die letzte der erstellten Proben (acht

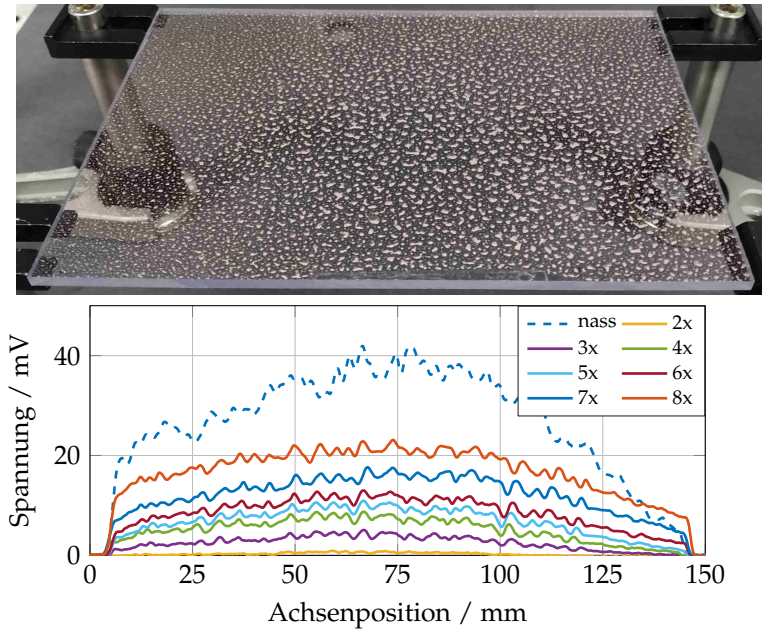


Abbildung 4.31: Aufgetragene Staubschichten bis zu einer maximalen Anzahl von acht Schichten (dargestellt im Foto oben). Mit steigender Anzahl an Schichten steigt das gemessene Streusignal weiter an, erreicht aber nicht die durch Wassertropfen erzeugte Messspannung (gestrichelt).

Schichten) gezeigt. Die Messung der ersten Schicht wird nicht dargestellt, da erst ab zwei Schichten ein Streusignal sichtbar ist. Das Messsignal steigt mit jeder aufgetragenen Schicht weiter an und zeigt, ähnlich wie bei den Messungen der aufgetragenen Wassertropfen, eine erhöhte Rückstreuung in der Plattenmitte. Dies ist hier ebenfalls durch das Aufsprühen in der Plattenmitte bedingt. Im Foto der acht aufgetragenen Schichten ist diese erhöhte Verteilung an Staub in der Mitte der Platte gut zu erkennen. Während für Wasser die Rückstreuung auf bis zu 84 mV ansteigt, erreicht diese bei den stärksten hier untersuchten

Verschmutzung nur Werte bis zu 23 mV. Höhere Verschmutzungsgrade werden nicht weiter untersucht, da der gezeigte Fall bereits eine starke Verschmutzung darstellt. Die Rückstreuung durch anhaftende Staubpartikel ist somit geringer als die durch Wassertropfen. Eine Unterscheidung, ob einzelne Wassertropfen oder stark ausgeprägte Staubschichten auf der Platte anhaften, ist mit dem System nicht möglich.

Der vorgestellte Messaufbau zur Interpretation des Streulichtes zeigt somit eine Empfindlichkeit gegenüber Wassertropfen und gleichzeitig auch anhaftenden Staubpartikeln. Für weitere Verunreinigungen wird eine vergleichbare Rückstreuung erwartet, sodass das System grundsätzlich für die Erkennung von Verunreinigungen verwendet werden kann. Sowohl für anhaftende Wassertropfen als auch Staubpartikel ist eine Mindestmenge der Verunreinigungen (Tropfen bzw. Partikel) notwendig, damit eine hinreichend große Rückstreuung gemessen werden kann. Durch Anpassung der Verstärkung könnten diese geringen Streusignale gemessen werden, was in dieser Arbeit nicht weiter untersucht wird. Die Erhöhung der Verstärkung führt aber gleichzeitig zu einer Erhöhung des Hintergrundrauschens, das in den vorgestellten Messungen unter Laborbedingungen konstant gehalten und somit eliminiert werden konnte. Man beachte dennoch, dass das Rauschsignal hier mit 3 mV selbst unter besten Bedingungen einen nicht zu vernachlässigen Bruchteil des durch die Streuung induzierten Messsignals darstellt. Unter realen Bedingungen bei wechselnder Sonneneinstrahlung wird die Eliminierung des Hintergrundrauschens nicht möglich sein, sodass Maßnahmen zur Reduzierung der Hintergrundstrahlung getroffen werden müssen. Dazu zählen beispielsweise eine geeignete Wahl der Wellenlänge der Lichtquelle sowie eine Verwendung von Bandpassfiltern vor der Photodiode. Dennoch bleibt die Empfindlichkeit gegenüber Hintergrundlicht ein großer Nachteil der vorgestellten Methodik.

4.5 ANALYSE DER DETEKTIONSMETHODEN

In diesem Kapitel wurden verschiedene Methoden zur Detektion von Verunreinigungen auf LiDAR-Sensoren betrachtet. Zu Beginn des Kapitels wurden bereits in der Literatur beschriebene Techniken vorgestellt, die meist für die Anwendung an Windschutzscheiben zur Steuerung der Scheibenwischer entwickelt oder patentiert wurden. Diese Methoden können in optische, elektronische und akustische Technologien unterteilt werden.

Die Verwendung von elektronischen Regensensoren an LiDAR-Schutzscheiben beruht immer auf der Integration von Leiterbahnen an der Außen- oder Innenseite der Schutzscheibe selbst. Neben vielen beschriebenen Nachteilen wie beispielsweise einer hohen Temperaturabhängigkeit oder dem Abrieb der Leiterbahnen durch die Scheibenwischer ist insbesondere der Störfaktor der Leiterbahnen selbst ein Ausschlusskriterium. Die Beeinflussung der optischen Eigenschaften des Sensors reduzieren dessen Performance, sodass die Verwendung elektronischer Regensensoren ausgeschlossen und hier nicht weiter verfolgt wurde.

Analog dazu werden auch akustische Regensensoren für die Integration an der Schutzscheibe ausgeschlossen, da die Anbringung der Ultraschallwandler an der Scheibe die optischen Eigenschaften ebenfalls negativ beeinflussen würde. In dieser Arbeit wurden deshalb keine weiteren Experimente mit akustischen Regensensoren durchgeführt.

Die naheliegendste Methode zur Schmutzdetektion in LiDAR-Sensoren ist die Nutzung des LiDAR-Sensors selbst. Da dieser elektromagnetische Strahlung durch die Schutzscheibe aussendet, wird ein Teil der Strahlung an Tropfen oder Verunreinigungen in Richtung des Detektors gestreut. Grundsätzlich können so Rückschlüsse auf

den Verschmutzungszustand der Schutzscheibe getroffen werden. In Abschnitt 4.2 wurde beispielhaft mit einem LiDAR-Sensor (Velodyne VLP-16) gezeigt, dass der Sensor erst ab einer definierten Mindestreichweite Objekte erkennt. Analog dazu wurde auch in Kapitel 3 bereits eine Mindestreichweite des verwendeten Sensors festgestellt. Die Ursache dafür ist der starke Anstieg des Rückstreusignals bei kurzen Distanzen, für die der verwendete Detektor nicht ausgelegt ist. Der Dynamikbereich des Detektors wird zu höheren Distanzen hin verschoben, sodass bei kurzen Distanzen der Detektor gesättigt und somit meist nicht aktiviert ist. Die Detektion von Verunreinigungen auf der Schutzscheibe ist somit nicht möglich.

Die Interpretation der Rückstreuung an Verunreinigungen wird auch in Fahrzeugen mit integrierten Kamera-Systemen, die für die Untersuchung der Fahrzeugumgebung ausgelegt sind, für die Schmutzzerkennung genutzt. Da eine Integration eines Kamera-Moduls in einen LiDAR-Sensor zu einer unverhältnismäßigen Kostensteigerung führt, wurden in dieser Arbeit keine Kameras zur Schmutzdetektion in LiDAR-Sensoren verwendet. Stattdessen wird die Messung der Rückstreuung durch eine zusätzliche Lichtquelle und einer Photodiode in Abschnitt 4.4 experimentell untersucht. Das System ist sowohl für anhaftende Wassertropfen als auch für Schmutzpartikel empfindlich. Durch Aussenden einer linienförmigen Lichtausbreitung durch die Schutzscheibe können sowohl die Lichtquelle als auch die Photodiode an die Rotation eines rotierenden LiDAR-Scanners gekoppelt und somit eine horizontale Auflösung entlang der Rotationsachse erzielt werden. Besonders nachteilig hingegen ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber Hintergrundlicht. Da nur ein sehr geringer Bruchteil der ausgesendeten Strahlung zurück zur Photodiode gestreut wird, kann die Überlagerung mit der Sonneneinstrahlung zu einem geringen SNR führen. Unklar ist, ob die Verunreinigungen dann noch vom Hintergrundrauschen unterschieden werden können.

Neben der Streulichtmessungen haben sich in aktuellen Fahrzeugen auf Totalreflexion basierende Regensensoren (TIR-Regensensoren) für die Steuerung der Scheibenwischer durchsetzen können. Diese werden meist hinter dem Innenspiegel verbaut und überwachen einen kleinen Teilbereich der Scheibe auf anhaftende Wassertropfen. In Kapitel 4.3 wird das Prinzip auf die Verwendung an LiDAR-Schutzscheiben erweitert. Ähnlich zum streubasierten System wird die Sensorrotation für eine horizontale Auflösung des Verschmutzungsgrades genutzt. Das gezeigte System erlaubt ebenfalls sowohl die Detektion von Wassertropfen als auch von festen Verunreinigungen. Das Messsignal skaliert hier direkt mit dem Verschmutzungsgrad auf der Oberfläche. Im Gegensatz zum streubasierten System wird durch die Nutzung der Schutzscheibe als Lichtleiter der Einfluss von Hintergrundlicht minimiert, da dieses abgeschirmt werden kann. Zusätzlich wird ein hohes Messsignal im Vergleich zu einem geringen Rauschsignal erwartet, sodass auch bei Hintergrundlicht ein hoher SNR bestehen bleibt. Nachteilig am System ist die notwendige Realisierung einer Ein- und Auskoppelmöglichkeit an der Schutzscheibe selbst, die mit einem Kosten- und Fertigungsaufwand verbunden ist.

Beide näher untersuchten Methoden zeigen somit Potential zur Erkennung von Verunreinigungen auf LiDAR-Sensoren. Die Erkennung von Wassertropfen und gleichzeitig auch fester Partikel wie Staub oder Salz ist sowohl mit der rückstreubasierten als auch mit der TIR-basierten Sensorik möglich. Gleichzeitig können beide Systeme auch an die Sensorrotation gekoppelt werden, um die Verschmutzung entlang der Rotationsachse zu beurteilen. Dies kann vorteilig zur Interpretation der LiDAR-Messdaten genutzt werden, um die Umgebungsdaten in Richtung stark verschmutzter Bereiche kritisch zu hinterfragen. Wie stark diese Einschränkung ist, kann durch den Verschmutzungsgrad beschrieben werden. Während die Rückstreuung beispielsweise bei unterschiedlicher Tropfenform sehr stark variiert, erlaubt die

TIR-basierte Messung eine wesentlich genauere Interpretation des Verschmutzungsgrades anhand des gemessenen Verlustsignals. Noch stärker zu bewerten ist die genannte Empfindlichkeit gegenüber Hintergrundlicht. Aufgrund der deutlich geringeren Messsignale streubasierter Methoden stellt die Rauschempfindlichkeit einen wesentlichen Nachteil gegenüber TIR-basierten Messsystemen dar.

Für die Weiterarbeit in dieser Arbeit wird sich deshalb auf das in Abschnitt 4.3 gezeigte Prinzip der Nutzung der Schutzscheibe als Lichtleiter beschränkt. Die bisher gezeigten Messungen stellen bereits das Potential einer solchen Sensorik dar. Dennoch bleiben mehrere Herausforderungen offen, die für die Integration in LiDAR-Sensoren vorausgesetzt sind. Die Ein- und Auskopplung wurde bisher durch Anstrahlen der Plattenkanten realisiert. Da die Schutzscheibe an den Endkanten in einem Gehäuse befestigt werden muss, sind die Kanten nicht zugänglich. Ein weiterer, offener Punkt ist die Charakterisierung der Art der anhaftenden Verunreinigungen. Soll ein Reinigungssystem bestehend aus Scheibenwischer und Spritzwasserdüsen gesteuert werden, so muss der Sensor erkennen, welche Verunreinigungen auf der Schutzscheibe anhaften. Das bisher gezeigte Prinzip muss somit noch um die genannten Punkte erweitert werden, um alle notwendigen Anforderungen zu erfüllen. Die weitere Untersuchung wird somit Teil des nächsten Kapitels sein, in dem die genannten Problemstellungen analysiert und gelöst werden.

KAPITEL 5

DETEKTION VON VERUNREINIGUNGEN MIT TIR

Die Möglichkeit der Nutzung der Sensorschutzscheibe als Lichtleiter wurde im vorherigen Kapitel bereits evaluiert. Erste Testmessungen zeigen, dass alle relevanten Verunreinigungen wie Wassertropfen oder Staubpartikel detektiert werden können. Durch Kopplung des gesamten Messsystems an eine lineare Bewegung der Schutzscheibe kann der Verschmutzungsgrad lokal entlang der Bewegungsrichtung aufgelöst werden. Durch Ausnutzung der Sensorrotation bei LiDAR-Sensoren mit zylindrischer Schutzscheibe kann analog der Verschmutzungsgrad jeweils auf Teilbereichen entlang der Rotationsachse, also vertikalen Ausschnitten, lokal bestimmt werden.

Zur kontrollierten und intelligenten Steuerung eines Reinigungssystems ist die alleinige Kenntnis über das Vorhandensein einer Verschmutzung auf der Sensorschutzscheibe nicht immer ausreichend. Wird der Sensor beispielsweise mit einem Scheibenwischer gereinigt, so werden feste Verunreinigungen die Scheibe weiter verschmieren und den Verschmutzungsgrad erhöhen. Auf Windschutzscheiben wird daher vor der Nutzung des Scheibenwischers eine Reinigungslösung auf die Scheibe aufgetragen. Dieser Vorgang wird allerdings durch den Fahrer ausgelöst und ist somit nicht direkt auf die Sensorik autonomer Fahrzeuge übertragbar. Infolgedessen ist eine Kenntnis über die Art der Verschmutzung notwendig, um ein Reinigungssystem aus Wischer und Spritzdüsen zu regeln.

In Abschnitt 5.1 wird die Lichtausbreitung in der Schutzscheibe genau untersucht. Dabei wird insbesondere die Winkelabhängigkeit der Propagation in einer Platte betrachtet, die mit einer winkelabhängigen Auskopplung an anhaftenden Verunreinigungen verknüpft ist. Nutzt man diese Kenntnis aus, so kann der Brechungsindex der anhaftenden Verunreinigungen durch eine Aufteilung der Intensitätsverteilung nach der Auskopplung aus der Platte bestimmt werden.

Das bis dahin vorgestellte Refraktometer eignet sich insbesondere für wissenschaftliche Anwendungen. Zur Schmutzdetektion an LiDAR-Sensoren wird das Messsystem auf die grundlegend notwendige Unterscheidung zur Steuerung von Scheibenwischer und Spritzwasserdüsen in Abschnitt 5.2 reduziert. Dabei wird zusätzlich die bisher gezeigte Ein- und Auskopplung durch Aufkleben von Prismen erweitert, sodass eine direkt in LiDAR-Sensoren integrierbare Lösung ermöglicht wird.

5.1 TIR-REFRAKTOMETER

Im vorgestellten TIR-Schmutzdetektionssystem in Kapitel 4.3 wurde eine divergente Lichtquelle genutzt, um eine homogene Strahlungsverteilung in der als Schutzscheibe genutzten Platte zu generieren. Die zur Messung der aus der Platte ausgekoppelten Strahlung verwendete Photodiode wurde nah an die Auskoppelfacetten platziert, um das gesamte, divergente Strahlenbündel aufzufangen. Bei näherer Betrachtung der Auskoppelstrahlung auf einem Schirm in 10 cm Abstand entsteht eine alternierende Intensitätsverteilung, die in Abbildung 5.1 durch Einkopplung mit einer divergenten, roten LED in eine Platte makroskopischer Dicke (hier 3 mm) aus PMMA resultiert. Das Vorhandensein dieser Intensitätsmodulation zeigt, dass die Winkel-

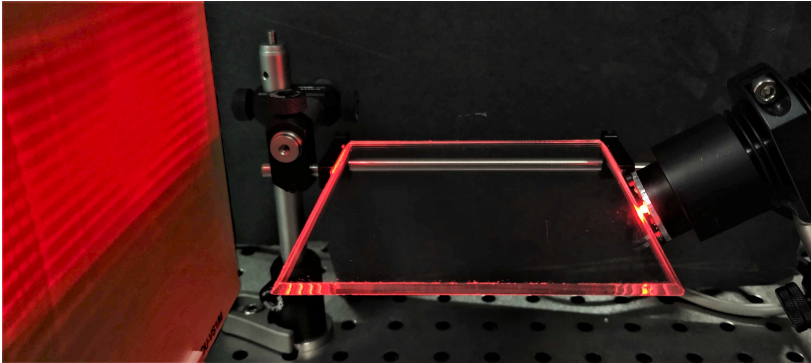


Abbildung 5.1: Intensitätsverteilung auf einem Schirm in 10 cm Entfernung nach Propagation von divergentem Licht einer roten LED durch eine 3 mm dicke Platte aus PMMA. Die vertikal alternierende Intensität resultiert aus der Ein- und Auskopplung über die 45° schrägen Kanten, die im Wechsel eine verlustarme bzw. verlustreiche Propagation erzeugen.

information der Strahlung bei der Propagation durch die Platte nicht verloren geht. Die alternierende Intensitätsverteilung ist eine Folge der Ein- und Auskopplung über die um 45° angeschrägten Kanten, aus der im Wechsel eine verlustarme bzw. verlustreiche Propagation für unterschiedliche Propagationswinkel folgt. Eine genauere Untersuchung ist im Anhang in Kapitel A.2 gezeigt. Daraus wird erkenntlich, dass die hellen und dunklen Bereiche auf dem Schirm aus der Überlagerung verschiedener Winkelbereiche entstehen. Bedingt durch die endliche Dicke der Platte treffen Strahlen unterschiedlicher Propagationswinkel auf jeweils gleiche Positionen auf dem Schirm. Das Ziel im folgenden Abschnitt ist es, diese Überlagerung zu unterbinden und die Winkelinformation aus der Intensitätsverteilung zu separieren. Haften dann Fremdkörper an der Außenseite der Platte an, so entsteht ein winkelabhängiger Verlust, über den der Brechungsindex des äußeren Mediums bestimmt werden kann.

5.1.1 SYSTEMAUFBAU UND DATENAUSWERTUNG

Die Intensitätsmodulation in Abbildung 5.1 ist eine Folge der winkelabhängigen Ausbreitung der gesamten Lichtverteilung in der Platte. Dabei ist die Propagation für manche Winkel innerhalb der Platte bevorzugt, während Strahlenbündel mit anderen Propagationswinkeln einen größeren Anteil aufgrund der Beschaffenheit der Kanten nicht auskoppeln können. In diesem Kapitel wird die winkelabhängige und somit auch vom Brechungsindex abhängige Auskopplung aus der Platte genutzt, sodass das vorgestellte System als Refraktometer dient.

Durch die Ausbreitung in der Platte werden Strahlen unterschiedlicher Winkel, die an unterschiedlichen Positionen auf der Einkoppelfacetten in die Platte koppeln, auf den Schirm in unterschiedlichen Höhen abgebildet. Die Amplitude des Signals an einer festen Schirmposition stellt allerdings nicht direkt die Propagation der Strahlung eines bestimmten Winkels dar, da durch die endliche Ausdehnung der Endfacette ein breites Strahlenbündel mit gleichem Propagationswinkel auch in einer endlichen Breite auf den Schirm trifft. In Abbildung 5.2a ist die Auskopplung an der Endfacette für zwei Strahlenbündel mit Propagationswinkeln α_1 und α_2 dargestellt, die nach Auskopplung unter den gebrochenen Winkeln α'_1 und α'_2 auf den Schirm treffen. Die Strahlenbündel erzeugen jeweils eine Erhöhung des Signals mit der Breite d_{α_1} bzw. d_{α_2} . Die Überlagerung der Strahlenbündel aller durch den Diffusor erzeugten Winkel liefert das gesamte Intensitätsmuster. Die aus der Propagation einzelner Winkel entstehenden Bereiche d_{α_i} überlappen auf dem Schirm, sodass auf einer festen Schirmposition ein definierter Winkelbereich überlagert wird. Zur genauen Messung des Brechungsindex anhaftender Materialien ist die Bestimmung des Grenzwinkels der Totalreflexion (Gleichung (4.2)) notwendig. Dies wiederum setzt eine scharfe Winkelabbildung voraus, um eine hohe Genauigkeit zu erreichen. Dazu kann eine Sammellinse verwendet

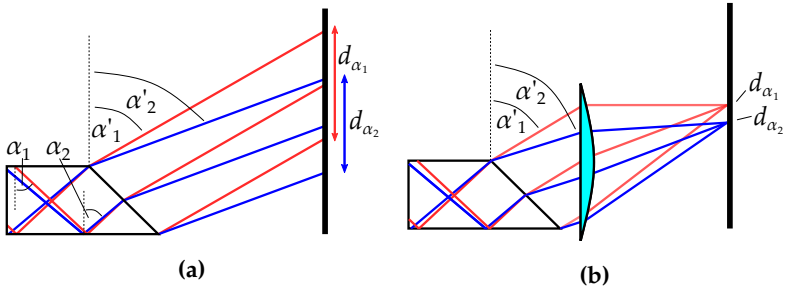


Abbildung 5.2: Auskopplung zweier Strahlenbündel mit Propagationswinkeln α_1 und α_2 . Strahlenbündel fester Winkel α_i erzeugen auf dem Schirm jeweils überlappende Bereiche d_{α_i} (a). Durch Einbringung einer Sammellinse werden Strahlen gleicher Winkel auf die gleiche Position auf dem Schirm in der Fokalebene abgebildet, sodass der Schirm die Winkelverteilung darstellt (b).

werden, die für die einzelnen Strahlenbündel eine Ortsabbildung in die Fokalebene bewirkt (Abbildung 5.2b). Durch Platzierung des Schirms in die Fokalebene entspricht jede Schirmposition unter der Annahme einer perfekten Linse der Projektion aller Strahlen mit gleichem Propagationswinkel.

In dem in Kapitel 4.3 vorgestellten System zur Erkennung von Verunreinigungen durch Nutzung der Schutzscheibe als Lichtleiter wurde mit einer einzelnen Photodiode die gesamte Lichtverteilung gemessen, sodass die Auswertung auf den gesamten Verschmutzungsgrad limitiert war. Die Messung wird in diesem Kapitel auf eine Vielzahl vertikal separierter Photodetektoren in Form einer Linienkamera erweitert, damit die einzelnen Winkelbereiche aufgelöst werden können. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.3a im Querschnitt skizziert. Die Sendeeinheit besteht aus einer LED (Thorlabs M590L3) bei 590 nm, einem darauffolgenden Diffusor (weißes Blatt Papier) und einer aufgeklebten Schlitzblende (Spalt 1, analog zu Aufbau in Abbildung 4.13). Das Licht propagiert dann mittels interner Totalreflexionen durch

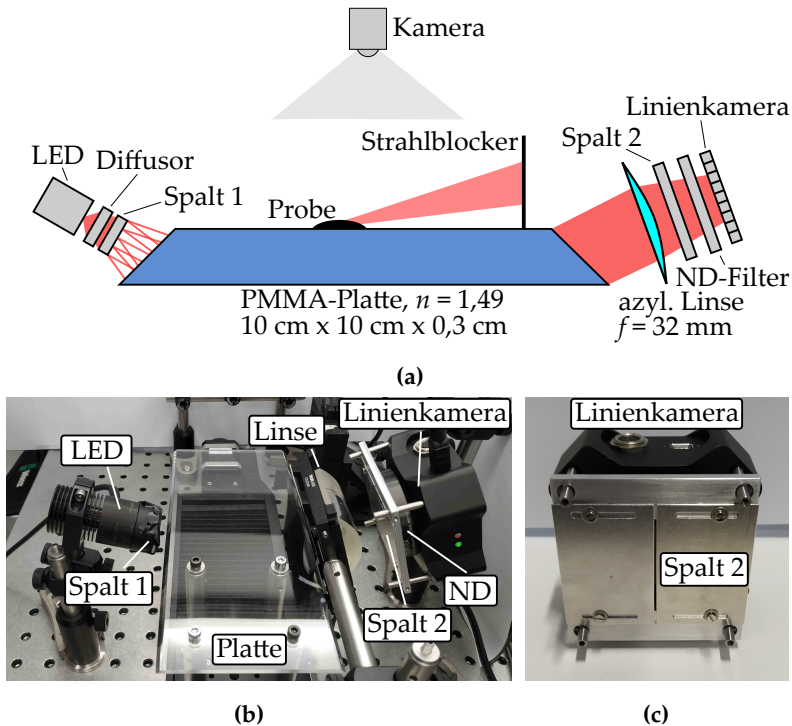


Abbildung 5.3: Erweiterung des Messaufbaus aus Kapitel 4.3 im Querschnitt (a) durch vertikale Aufspaltung der Winkelanteile in der Platte mit einer Zylinderlinse. Die Linse bildet die einzelnen Anteile auf eine Linienkamera ab. Aufbau in der Draufsicht in (b). Die zusätzliche Blende (Spalt 2) wirkt der horizontalen Divergenz des Diffusors entgegen, wirkt aber gleichzeitig auch als Filter von Umgebungslicht (c).

eine PMMA-Platte mit Dimensionen von 10 cm x 10 cm x 3 mm entlang des gezeigten Querschnitts. Nach der Auskopplung trifft das Licht auf eine Zylinderlinse (Thorlabs AYL4532) mit $f = 32$ mm, die das Licht in vertikaler Richtung in die Fokusebene abbildet. In diese wird die Linienkamera (Thorlabs LC100) mit 2048 Pixeln bei einem Pixelabstand von 14 μm und einer sensitiven Fläche von insgesamt

28,67 mm x 56 μm positioniert. Vor der Linienkamera wird ein weiterer Spalt (Abbildung 5.3c) platziert. Dieser Spalt unterdrückt weiterhin die horizontale Divergenz, die durch den Diffusor erzeugt wird. Gleichzeitig wird der Spalt so mit der Linienkamera verbunden, dass außer diesem kein weiteres Licht die Kamera erreichen kann, um Streulichteinflüsse zu minimieren. Aufgrund der hohen Sensitivität der Linienkamera wird ein Neutralsichtfilter (ND 1) zwischen Kamera und Spalt platziert. Zur Reduzierung der Einfallswinkel auf der Linse werden alle Komponenten im Empfangsteil um den Winkel $\epsilon = 70^\circ$ zur Plattenoberfläche gekippt. Die zu untersuchende Probe wird tropfenweise auf der Plattenoberfläche entlang der Propagationsrichtung verteilt. Oberhalb der Platte wird eine weitere Kamera zur Aufnahme der aktuellen Probenverteilung verwendet.

Im ersten Schritt wird die mit der Linienkamera gemessene Intensität ohne Vorhandensein einer Probe betrachtet. Die damit gemessene Referenz kann analog zu den Ergebnissen in Kapitel 4.3 zur Normierung der Messdaten verwendet werden. Abbildung 5.4 zeigt die gemessene Referenzintensität in Abhängigkeit der jeweiligen Kamerapixel, die zur Übersichtlichkeit auf das Maximum normiert ist. Das entstandene Linienbild ähnelt trotz der optischen Abbildung dem gezeigten Intensitätsmuster mit wechselnden Maxima und Minima aus Abbildung 5.1. Die Einhüllende beschreibt einen steigenden Verlauf zum oberen Kamerabereich hin, der sich etwa ab Pixel 1400 sättigt. Die Form der Einhüllenden ist im Wesentlichen durch die Abstrahlcharakteristik der LED und des Diffusors sowie den Ein- und Auskoppelbedingungen der Platte bedingt und spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. An mehreren Stellen sind kurze, starke Einbrüche in der Intensität sichtbar (Pixel 169, 640, 940, 1470 und 1707), die durch einen Defekt im Kamerachip bedingt sind und deshalb nicht weiter betrachtet werden. Aus der simulativen Beschreibung der Lichtausbreitung in der Platte (Anhang A.2) folgt, dass mit steigendem Propagationswinkel

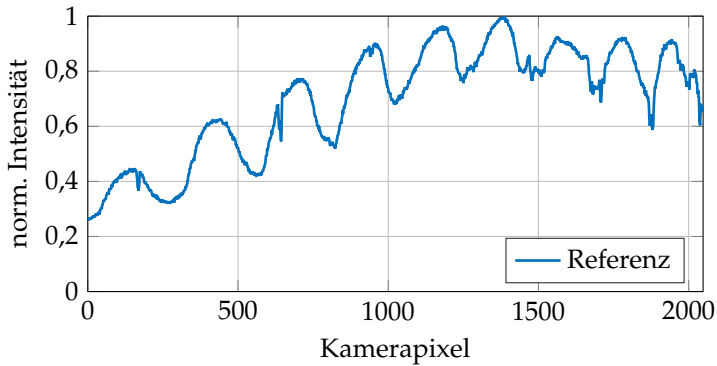


Abbildung 5.4: Referenzmessung der Linienkamera im vorgestellten Versuchsaufbau. Ähnlich zu den Ergebnissen ohne Linse sind alternierende Maxima und Minima zu erkennen, die aus der Plattengeometrie resultieren.

immer wieder durch die Plattengeometrie bedingte Sprünge in der Auskopplung auftreten, die diese Intensitätsmodulationen erzeugen. Die durch die Zylinderlinse bewirkte Ortsabbildung der Winkelanteile hebt diese Modulationen nicht auf. Die Propagation durch die Platte ist somit für bestimmte Winkel bevorzugt beziehungsweise für alternierende Winkel verlustbehaftet. In der Simulation in Kapitel A.2 wird gezeigt, dass die Sprünge immer dann auftreten können, wenn sich der letzte Auftreffpunkt der internen Totalreflexionen auf der Plattenoberseite befindet. Der Anteil aller Strahlen, die an der Innenseite der Endfacette erneut totalreflektieren, bewirken den Verlust für den entsprechenden Propagationswinkel. Abbildung 5.5 zeigt den Verlustanteil (grau) neben dem jeweiligen Mittelstrahl durch die Platte (rot) für steigende Propagationswinkel von oben nach unten. Da überall auf der Einkoppelfläche Strahlen mit jedem Winkel einkoppeln, bestimmt die Breite des Verlustanteils den Intensitätsverlust (Diagramm rechts). Mit zunehmendem Winkel steigt und fällt die Breite des Verlustbereichs und entgegengesetzt dazu die Intensität im Wechsel, sodass die

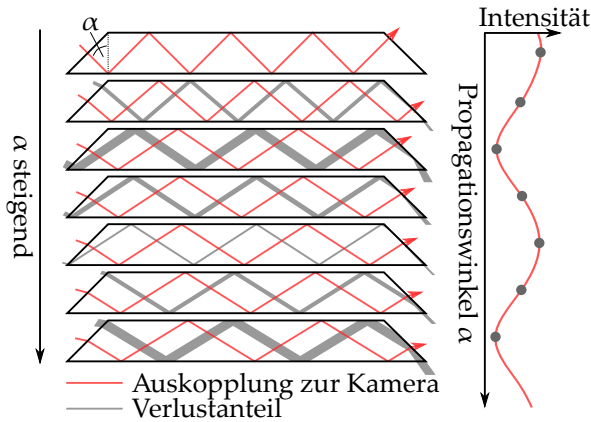


Abbildung 5.5: Beschreibung des winkelabhängigen Verlusts bei Propagation durch die Platte. Mit steigendem Propagationswinkel α entsteht ein alternierender Verlustanteil (grau), der den Anteil der Einkoppelfacetten beschreibt, die nicht in Richtung Detektor auskoppeln.

alternierende Intensitätsverteilung resultiert. Die Beschreibung des winkelabhängigen Verlustes im Diagramm entspricht der gezeigten Messung, in der die Winkel auf die Kamerapixel abgebildet werden.

Im nächsten Schritt werden verschiedene zu messende Proben auf der Oberfläche der Platte aufgetragen. Dazu werden Saccharoselösungen verwendet, deren Brechungsindex mit dem Zuckergehalt skaliert [110, 111]. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden Zuckerstandards verwendet, deren Brechungsindizes mit einem kalibrierten state-of-the-art Refraktometer mit einer Genauigkeit kleiner $1,4 \cdot 10^{-4}$ bei einem Konfidenzniveau von 95 % gemessen wurden [112]. Die Brechungsindizes der acht verwendeten Zuckerlösungen liegen in einem Bereich von $1,35568 - 1,43080$ und sind in Tabelle 5.1 angegeben. Fünf der Lösungen werden zur Kalibrierung des Systems verwendet, während die restlichen drei Lösungen zur Evaluierung der Systemgenauigkeit genutzt werden.

Tabelle 5.1: Verwendete Saccharoselösungen zur Kalibrierung und zur Evaluierung der Genauigkeit des vorgestellten Refraktometers.

#	Brechungsindex n	benutzt für:
1	1,35568	Kalibrierung
2	1,37233	Systemtest
3	1,38115	Kalibrierung
4	1,39032	Systemtest
5	1,39986	Kalibrierung
6	1,40978	Kalibrierung
7	1,42009	Systemtest
8	1,43080	Kalibrierung

Die Zuckerlösungen werden tropfenweise auf der Oberfläche der Platte platziert. Abbildung 5.6 zeigt beispielhaft einen Tropfen mit einem Durchmesser von ca. 10 mm auf der Oberseite der Platte entlang der Propagationsrichtung (hier von oben nach unten). Zur besseren Sichtbarkeit wurde ein weißes Blatt Papier unterhalb des Tropfens platziert. Auf der Plattenoberfläche sind zusätzlich zwei Strahlblocker sichtbar. Der erste Blocker (oben) wird direkt nach dem Diffusor verwendet, um zu verhindern, dass Licht oberhalb der Platte propagiert und über die Tropfen in die Platte einkoppelt oder die Kamera auf direktem Wege erreicht. Der zweite Blocker blockt den Strahlungsanteil, der aus den Tropfen auskoppelt. In einer späteren Anwendung wird dieser nicht benötigt, wenn die Prismen auf der Innenseite der Schutzscheibe angebracht sind und die Verunreinigungen auf der Außenseite anhaften.

Für jede der Zuckerlösungen werden fünf Messungen mit unterschiedlichen Tropfenpositionen entlang der Propagationsrichtung gemacht. Zwischen den Messungen wird die Platte gereinigt, um etwaige Zu-

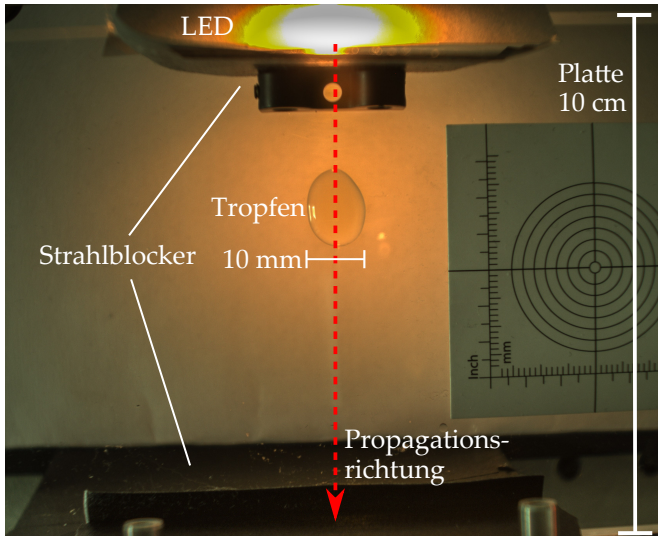


Abbildung 5.6: Aufnahme der Zuckerlösung in Form eines Tropfens von ca. 10 mm Durchmesser, der entlang der Propagationsrichtung auf der Oberseite der Platte platziert wurde. Zur Reduzierung von Streulicht werden zwei Strahlblocker auf der Oberfläche verwendet.

ckerrückstände zu entfernen. Abbildung 5.7 zeigt die gemessene Intensität beispielhaft für drei Zuckerlösungen (#1, #5 und #8), die zur Kalibrierung des Systems genutzt werden zusammen mit der Referenzmessung (saubere Platte) in blau. Zur besseren Vergleichbarkeit sind alle Messungen auf das Maximum der Referenzmessung normiert. Im unteren Bereich der Kamera stimmen die gemessenen Intensitäten mit dem Referenzsignal überein. Zum oberen Bereich der Kamera hin bricht die Intensität ab einem vom Brechungsindex der Probe abhängigen Pixel ein und fällt bis zu einem vollständigen Signalverlust ab. Dieser für den Brechungsindex charakteristische Pixel, ab dem der Signaleinbruch auftritt, entspricht genau dem Pixel, auf den die unter dem kritischen Winkel propagierenden Strahlen in der Platte abgebil-

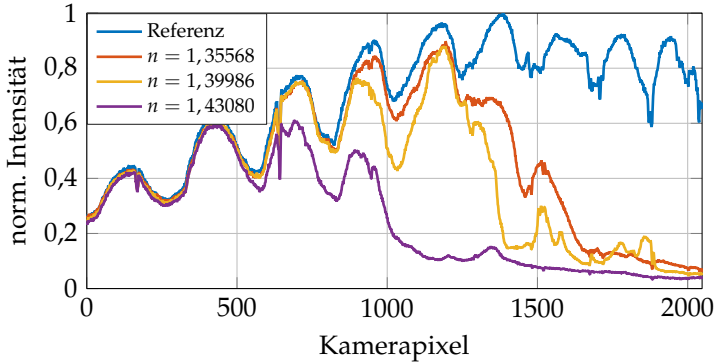


Abbildung 5.7: Kameramessung für drei Zuckerlösungen mit unterschiedlichen Brechungsindizes. Während die Messungen im unteren Kamerabereich mit der Referenzmessung (saubere Platte) übereinstimmen, bricht das Signal zum oberen Kamerabereich ein. Der Startpunkt dieses Einbruchs verschiebt sich gegenläufig zum Brechungsindex.

det werden. Im weiteren Verlauf wird dieser hier deshalb als kritischer Pixel bezeichnet. Mit steigendem Brechungsindex der Zuckerlösung steigt auch der kritische Winkel an gemäß

$$\alpha_c(n) = \sin^{-1} \left(\frac{n}{n_p} \right). \quad (5.1)$$

Die beiden Brechungsindizes entsprechen jeweils dem Brechungsindex der Probe n sowie dem der Platte $n_p = n_{\text{PMMA}} = 1,49$. Die kritischen Pixel verschieben sich somit mit steigendem Brechungsindex weiter in den unteren Bereich des Detektors. Für Propagationswinkel oberhalb α_c ist die Bedingung der Totalreflexion nicht erfüllt, sodass ein Teil des Lichts aus der Platte auskoppelt. Die winkel- und brechungsindexabhängige Intensität des reflektierten Lichts an der Grenzfläche wird durch die Fresnel-Gleichungen für nicht-magnetische, dielektrische

Materialien zur Berechnung der Reflexionskoeffizienten r_s und r_p für s- und p-polarisiertes Licht

$$r_s = \frac{n_p \cos \alpha - n \cos \alpha_b}{n_p \cos \alpha + n \cos \alpha_b}, \quad r_p = \frac{n \cos \alpha - n_p \cos \alpha_b}{n \cos \alpha + n_p \cos \alpha_b} \quad (5.2)$$

mit Propagationswinkel α und

$$\cos \alpha_b = \frac{\sqrt{n^2 - n_p^2 \sin^2 \alpha}}{n} \quad (5.3)$$

beschrieben. Der Reflexionsgrad wird durch das Quadrat der Reflexionskoeffizienten bestimmt. Da LEDs unpolarisiertes Licht emittieren, werden die Reflexionsgrade der unterschiedlichen Polarisationsrichtungen gemittelt zu

$$R = \frac{r_s^2 + r_p^2}{2}. \quad (5.4)$$

Der Reflexionsgrad entspricht dem Anteil der Intensität nach einer einzelnen Reflexion an der Grenzfläche der Platte zu dem äußeren Medium. Die gemessene Intensität in Abbildung 5.7 ist noch mit den Oszillationen aus der Referenz überlagert, sodass der exakte Punkt, ab dem das Signal einbricht, nicht ausgelesen werden kann. Die jeweils mit anhaftenden Tropfen gemessenen Ergebnisse werden deshalb mit der Referenzmessung normiert, um den durch die Tropfen induzierten Verlust zu isolieren. Die aus den gezeigten Messungen berechnete normierte Intensität ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Im unteren Kamerabereich zeigt sich eine gleich bleibende Intensität, bis diese ab dem kritischen Pixel nach oben hin abfällt. Mit steigendem Brechungsindex verschiebt sich der kritische Pixel auf der Kamera nach unten, da der zugehörige kritische Winkel größer wird und damit eine flachere Propagation beschreibt. Zum Vergleich der fallenden Flanke mit dem nach Gleichungen (5.2)-(5.4) berechneten Reflexionsgrad ist dieser horizontal verschoben beispielhaft für einen frei gewählten Winkelbereich dargestellt (grün gestrichelt). Die Messergebnisse zeigen somit einen

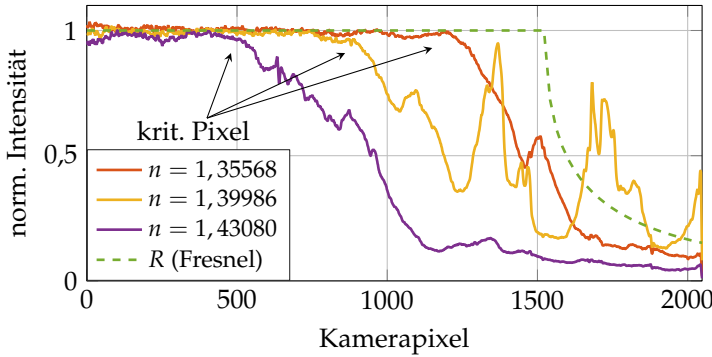


Abbildung 5.8: Normierte Intensität für die drei Zuckerlösungen (#1, #5 und #8). Die Amplitude bleibt nahezu konstant bei 1, bis sie ab dem kritischen Pixel nach unten einbricht, der mit größerem Brechungsindex in den unteren Kamerabereich verschiebt. Die fallende Flanke ist mit Artefakten überlagert und unterscheidet sich von dem zu erwartenden Fresnel-Verlauf (grün gestrichelt).

weniger steilen Abfall der Intensität im Vergleich zu dem erwarteten Verlauf. Zusätzlich ist die fallende Flanke mit unterschiedlich stark ausgeprägten Artefakten überlagert, die aus einer inhomogenen Winkelverteilung der gesamten in der Platte propagierenden Strahlung resultieren. Während alle Strahlen mit Propagationswinkel $\alpha = 45^\circ$ jeden Punkt auf der Oberkante der Platte treffen, gilt dies nicht für Propagationswinkel $\alpha > 45^\circ$. Durch die Projektion der um 45° schrägen Eintrittsfläche unter dem Winkel α auf die ebene Oberfläche entstehen blinde Bereiche, in denen keine Strahlen mit dem entsprechenden Propagationswinkel an der Oberfläche reflektiert werden (Abbildung 5.9). Die vom Propagationswinkel α und von der Plattendicke d abhängige Breite dieser Bereiche d_{bs} wird berechnet mit

$$d_{bs} = d \tan(\alpha) - d. \quad (5.5)$$

Für Wasser mit $n = 1,33$ und $\alpha_c = 63,2^\circ$ folgt beispielsweise $d_{bs} = 2,9$ mm. Einzelne Tropfen mit einem Durchmesser kleiner als d_{bs} kön-

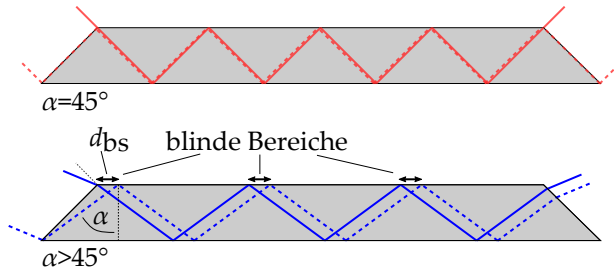


Abbildung 5.9: Entstehung blinder Bereiche mit der Breite d_{bs} für Propagationswinkel oberhalb 45° . Mit steigendem Propagationswinkel nimmt d_{bs} zu.

nen deshalb bei einer exakten Positionierung in einem blinden Bereich zu einer Ungenauigkeit in der Brechungsindexbestimmung führen. Für die hier verwendete Zuckerlösung mit $n = 1,43080$ und $\alpha_c = 70,9^\circ$ folgt bereits $d_{bs} = 7,3 \text{ mm}$. Die Länge d_{bs} definiert den minimalen Tropfendurchmesser, der nicht zu einer durch die blinden Bereiche bedingten Ungenauigkeit führen kann. Eine Anlagerung eines einzelnen Tropfens exakt im blinden Bereich ist generell sehr unwahrscheinlich, da eine kleine Verschiebung zu diesem Bereich die entstehenden Ungenauigkeiten bereits aufhebt. Tritt der Fall dennoch auf, so werden die Strahlenbündel mit nur geringfügig unterschiedlichem Propagationswinkel den blinden Bereich ausfüllen und den zugehörigen kritischen Winkel fehlerhaft definieren.

Zur Untersuchung des Einflusses der Probenposition sind fünf Messungen mit unterschiedlich platzierten Tropfen bei $n = 1,39986$ in Abbildung 5.10 gezeigt. Der durch Totalreflexion entstehende Bereich bis ca. Pixel 900 sowie der Beginn des Signaleinbruchs bis zu 75 % der Referenzintensität bleiben größtenteils unbeeinflusst. Für alle Werte im darauffolgenden Kamerabereich entstehen starke und sehr unterschiedliche Signalschwankungen aufgrund der unterschiedlichen Positionen. Da für eine weitere Auswertung nur der kritische Pixel be-

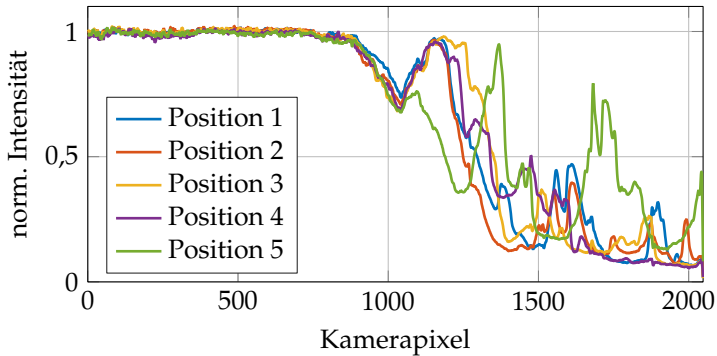


Abbildung 5.10: Einfluss der Tropfenposition bei $n = 1,39986$. Während der Bereich der Totalreflexion unverändert bleibt, ist der Verlustbereich mit starken, von der Position abhängigen Artefakten überlagert.

nötigt wird, sind die Signalschwankungen unerheblich. Interessant ist, dass auch im Bereich oberhalb des kritischen Pixels das Signal wieder auf den Referenzwert ansteigen kann (z.B. im Bereich Pixel 1200). Neben der beschriebenen Inhomogenität kann dafür ein weiterer Effekt verantwortlich sein. Die in den Tropfen auskoppelnde Strahlung kann innerhalb des Tropfens erneut totalreflektieren, da nach außen hin (Luft) wieder ein geringer Brechungsindex vorliegt. Das Licht kann dadurch zurück in die Platte einkoppeln. Aufgrund der gekrümmten Tropfenoberfläche propagiert das zurückgekoppelte Licht aber mit einem kleineren Propagationswinkel und beeinflusst deshalb nicht den Bereich der Totalreflexion.

Zur Bestimmung des Brechungsindex der anhaftenden Tropfen muss der kritische Pixel ausgelesen und in den kritischen Winkel umgerechnet werden. Der Übergang von Totalreflexion in den Verlustbereich ist allerdings durch Ungenauigkeiten in der Platte und der Abbildung durch die Linse nicht scharf, sodass eine Fitfunktion benötigt wird. Aufgrund der hohen Signalschwankungen kann die Intensität nicht

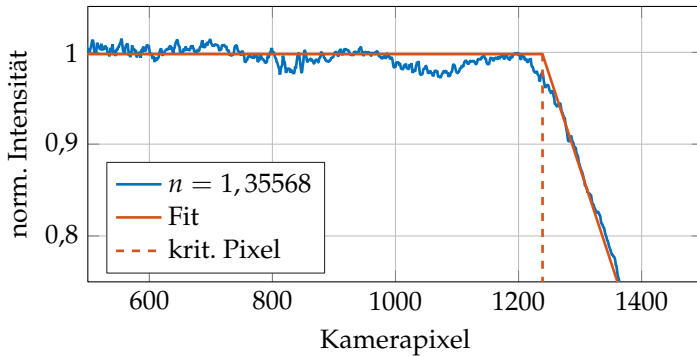


Abbildung 5.11: Für den Fit genutzter Datenbereich in blau für $n = 1,35568$ mit zugehörigem Fit in rot. Der kritische Pixel wird aus dem Umkehrpunkt ausgelesen und entspricht hier $p_{\text{krit}} = 1239$.

mit den Fresnel-Gleichungen für den Reflexionskoeffizienten angefitet werden. Der Übergang der Totalreflexion in den Verlustbereich ist wie in Abbildung 5.10 erkennbar in einem kleinen Bereich nicht durch die Rückkopplung beeinflusst. Dieser Bereich wird als Fitbereich verwendet. Der Umkehrpunkt zur Totalreflexion kann dann mit

$$I(p) = \begin{cases} 1, & \text{für } p < p_{\text{krit}} \\ mp + b, & \text{für } p \geq p_{\text{krit}} \end{cases} \quad (5.6)$$

angefittet werden. Dabei beschreibt p die Kamerapixel, p_{krit} den kritischen Pixel, m die Steigung und b den Achsenabschnitt der linearen Funktion. Der erste Teil der Gleichung entspricht dem konstanten, unbeeinflussten Bereich der Totalreflexion. Die Geradengleichung beschreibt den Umkehrpunkt an der Stelle p_{krit} bis zu einem Bereich, ab dem die Intensitätsschwankungen stark zunehmen (unterhalb 75%). Abbildung 5.11 zeigt den genutzten Fitbereich der Daten für $n = 1,35568$ in blau und den daraus resultierenden Fit in rot. Aus dem Umkehrpunkt wird der kritische Pixel ausgelesen (rot gestrichelt) zu $p_{\text{krit}} = 1239$.

5.1.2 KALIBRIERUNG DES SYSTEMS

Die Bestimmung der kritischen Pixel mit Gleichung (5.6) erfolgt nun für alle verwendeten Zuckerlösungen zur Kalibrierung des Systems. Tabelle 5.2 zeigt die kritischen Pixel p_{krit} als Mittelwert mit zugehöriger Standardabweichung $s_{p_{\text{krit}}}$, die aus je fünf Messungen mit unterschiedlichen Tropfenpositionen resultieren. Durch die endliche Breite der einzelnen Pixel empfängt selbst bei einer perfekten Abbildung jeder Pixel einen gewissen Winkelbereich. Die evaluierten kritischen Pixel sind deshalb keine ganzzahligen Werte, da die Umkehrpunkte von Totalreflexion zur verlustbehafteten Reflexion ebenfalls nicht ganzzahlig sind.

Die kritischen Pixel bei bekanntem Brechungsindex sollen nun verwendet werden, um den Brechungsindex unbekannter Proben zu bestimmen. Dazu wird der Zusammenhang zwischen dem Propagationswinkel α in der Platte und dem kritischen Pixel benötigt. Der Zusammenhang ist mit der optischen Abbildung der Linse auf den Detektor verbunden und kann geometrisch hergeleitet werden. Alle

Tabelle 5.2: Mittelwerte der ermittelten kritischen Pixel p_{krit} und zugehörige Standardabweichungen $s_{p_{\text{krit}}}$ für die zur Systemkalibrierung genutzten Zuckerlösungen bei je fünf Messungen.

#	n	p_{krit}	$s_{p_{\text{krit}}}$
1	1,35568	1235,6	7,3
3	1,38115	1024,6	15,2
5	1,39986	857,2	15,1
6	1,40978	742,7	8,6
8	1,43080	484,1	15,9

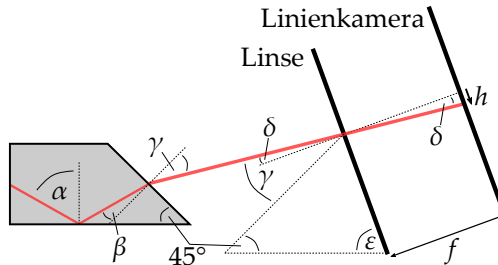


Abbildung 5.12: Positionierung von Linse und Kamera zur Auskoppelfacetten unter dem Winkel ϵ . Ausgehend von der Propagation in der Platte unter dem Winkel α kann dieser in die Höhe h auf dem Detektor umgerechnet werden. Durch Betrachtung des kritischen Winkels α_c kann der Zusammenhang zwischen kritischem Pixel p_{krit} und Brechungsindex n hergeleitet werden.

notwendigen Parameter sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Die Einkopplung und Propagation durch die Platte wird dazu nicht benötigt. Zu Beginn wird die Auskopplung aus der Platte mit dem Brechungsgesetz beschrieben

$$\frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = \frac{n_{\text{Luft}}}{n_p} = \frac{1}{n_p} \Leftrightarrow \beta = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \gamma}{n_p} \right). \quad (5.7)$$

Der Winkel β ist über die 45° -Kante mit α verknüpft durch $\beta = \alpha - 45^\circ$. Der ausgekoppelte Strahl trifft anschließend unter dem Winkel γ in Bezug zur optischen Achse der Auskoppelfacetten auf die Linse, die um ϵ zur Plattenebene verkippt ist. Durch die Verkipfung ändert sich auch die optische Achse, sodass der Einfallswinkel δ auf die Linse beschrieben werden kann durch

$$\delta = \gamma - \epsilon + 45^\circ \Leftrightarrow \gamma = \delta + \epsilon - 45^\circ. \quad (5.8)$$

Die Linse sammelt das Licht gleicher Einfallswinkel δ auf einem Punkt in der Höhe h . Durch die geometrische Betrachtung der Mittelpunktstrahlen folgt

$$\tan \delta = \frac{-h}{f} \Rightarrow \delta = \tan^{-1} \left(\frac{-h}{f} \right). \quad (5.9)$$

Dabei beschreibt $h = 0$ das Zentrum des Detektors. Die Messung mit der Kamera liefert die Intensitätswerte in Abhängigkeit der Kamerapixel p . Diese können mit der Detektorlänge (28,672 mm) und der Anzahl an Pixeln in die Höhe h umgerechnet werden durch

$$h = \frac{p \cdot 28,672 \text{ mm}}{2048} = p \cdot 0,014 \text{ mm}. \quad (5.10)$$

Gleichungen (5.7)-(5.9) können nun verwendet werden, um eine Beziehung zwischen den evaluierten kritischen Pixeln p_{krit} beziehungsweise der Höhe h und dem Brechungsindex n der anhaftenden Probe herzuleiten. Ausgehend von dem Zusammenhang von Brechungsindex und Totalreflexion folgt

$$\begin{aligned} n &= n_p \sin(\alpha_c) \\ &= n_p \sin(\beta + 45^\circ) \\ &\stackrel{(5.7)}{=} n_p \sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{\sin \gamma}{n_p} \right) + 45^\circ \right) \\ &\stackrel{(5.8)}{=} n_p \sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{\sin(\delta + \epsilon - 45^\circ)}{n_p} \right) + 45^\circ \right) \\ &\stackrel{(5.9)}{=} n_p \sin \left(\sin^{-1} \left(\frac{\sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{-h}{f} \right) + \epsilon - 45^\circ \right)}{n_p} \right) + 45^\circ \right). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Mit Gleichung (5.11) können die evaluierten kritischen Pixel in Tabelle 5.2 in Abhängigkeit des Brechungsindex prinzipiell umgerechnet werden. Die absolute Höhe h ist allerdings nicht bekannt, da nur die Relativwerte aus den Detektorpixeln folgen. Gleichung (5.11) wird

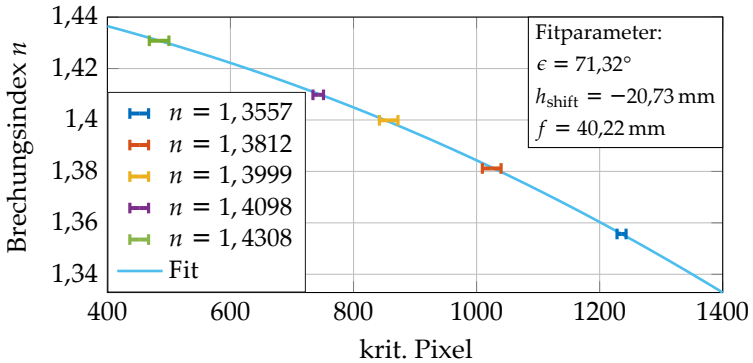


Abbildung 5.13: Evaluierete kritische Pixel für die fünf Zuckerlösungen mit bekanntem Brechungsindex. Die horizontalen Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung aus den fünf Messungen je Zuckerlösung. Die aus Gleichung (5.11) resultierende Fitfunktion (hellblau) liefert die Systemparameter mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9998$.

deshalb als Fitfunktion verwendet, um die absolute Detektorhöhe $h = h_0 + h_{\text{shift}}$ zu bestimmen. Um weitere Ungenauigkeiten in der Positionierung der Komponenten auszugleichen, wird zusätzlich die Verkippung ϵ als Fitparameter verwendet. Obwohl die Brennweite eine feste Größe der Linse ist, ist der Abstand des Detektors zur Linse variabel und fehlerbehaftet, sodass die Brennweite f ebenfalls als Fitparameter herangezogen wird.

Abbildung 5.13 zeigt den bekannten Brechungsindex der verwendeten Zuckerlösungen in Abhängigkeit der evaluierten kritischen Pixel mit Angabe der Standardabweichung als Fehlerbalken. Durch Nutzung von Gleichung (5.11) ergibt sich der in hellblau dargestellte Fit. Die Fitfunktion zeigt eine gute Korrelation mit den Messdaten mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9998$ für $\epsilon = 71,32^\circ$, $h_{\text{shift}} = -20,73$ mm und $f = 40,22$ mm. Der resultierende Abstand der Kamera zur Linse liegt somit deutlich höher als die vom Hersteller angegebene Brenn-

weite mit $f = 32$ mm. Dennoch konnten mit dieser Einstellung die besten Ergebnisse erzielt werden, sodass die Unstimmigkeiten möglicherweise durch die starke Krümmung der Brennebene bedingt sind.

5.1.3 VERIFIZIERUNG DER MESSGENAUIGKEIT

Zur Ermittlung der Fitparameter wurden Zuckerlösungen mit bekanntem Brechungsindex verwendet, die den evaluierten kritischen Pixeln zugeordnet werden konnten. Die Relation kann nun für beliebige Flüssigkeiten mit unbekanntem Brechungsindex genutzt werden, um aus den ermittelten kritischen Pixeln den Brechungsindex zu berechnen. In Tabelle 5.1 sind die in dieser Arbeit verwendeten Zuckerlösungen mit Angabe des Brechungsindex gegeben. Die Lösungen #2, #4 und #7 wurden nicht zur Systemkalibrierung verwendet und werden nun durch Brechungsindexbestimmung und Vergleich mit den Herstellerangaben zur Untersuchung der Messgenauigkeit genutzt.

Das Messverfahren erfolgt analog zur Datenaufnahme für die Kalibrierung, indem die kritischen Pixel durch Anfitzen des Umkehrpunktes von Totalreflexion zu verlustbehafteter Reflexion für fünf Messungen bestimmt werden. Die daraus resultierenden kritischen Pixel werden mit Gleichung (5.11) und den Fitparametern des vorigen Abschnitts ($\epsilon = 71,32^\circ$, $h_{\text{shift}} = -20,73$ mm, $f = 40,22$ mm) in den jeweiligen Brechungsindex umgerechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Die Größe p_{krit} beschreibt den Mittelwert der kritischen Pixel mit der Standardabweichung $s_{p_{\text{krit}}}$ und n_{exp} die daraus errechneten Brechungsindizes mit Standardabweichung $s_{n_{\text{exp}}}$. Für die ermittelten kritischen Pixel zeigt sich eine mittlere Standardunsicherheit von 16 Pixeln beziehungsweise $1,6 \cdot 10^{-3}$ für die Bestimmung der Brechungsindizes. Zum Vergleich sind die vom Hersteller ermittelten Brechungsindizes der Lösungen als n_{suppl} angegeben. Die relativen

Tabelle 5.3: Evaluierte kritische Pixel p_{krit} mit Standardabweichung $s_{p_{\text{krit}}}$ und daraus berechnete Brechungsindizes n_{exp} mit Standardabweichung $s_{n_{\text{exp}}}$ für die drei Zuckerlösungen #2, #4 und #7 bei 589 nm im Vergleich zu den Herstellerangaben n_{suppl} .

#	p_{krit}	$s_{p_{\text{krit}}}$	n_{exp}	$s_{n_{\text{exp}}}$	n_{suppl}	Δn (%)
2	1111,4	9,4	1,3714	0,0011	1,37233	0,07
4	928,8	22,1	1,3920	0,0023	1,39032	0,12
7	649,2	16,4	1,4182	0,0014	1,42009	0,13

Abweichungen der Ergebnisse des vorgestellten Refraktometers zu den Herstellerangaben liegen im Bereich von 0,07 % – 0,13 %.

Die mittlere Genauigkeit des vorgestellten Messsystems liegt im Bereich von $1,6 \cdot 10^{-3}$. Die resultierenden Unsicherheiten entstehen hauptsächlich aus den Unebenheiten der prismenförmigen Kanten der Platte, die bereits in Kapitel 4.3 gezeigt wurden. Durch diese Unebenheiten werden Strahlen gleicher Winkel an unterschiedlichen Auskoppelhöhen auch in unterschiedliche Winkel ausgekoppelt, die wiederum in der Verwischung der Winkelverteilung auf der Kamera resultiert. Sind höhere Genauigkeiten gefordert, so bietet sich ein Messsystem mit Glasprismen an, die eine höhere Oberflächengenauigkeit aufweisen. Eine weitere Einschränkung der Systemgenauigkeit resultiert aus der gekrümmten Fokusebene der verwendeten Zylinderlinse. Durch die Positionierung der Kamera in die gekrümmte Fokusebene wird nur ein geringer Teil scharf abgebildet. Ein diesbezüglich optimiertes Kameraobjektiv kann die Genauigkeit des Systems weiter erhöhen.

Neben den aus Ungenauigkeiten der Komponenten entstehenden Fehlern spielt auch die Systemauslegung eine wesentliche Rolle für

die Genauigkeit der Brechungsindexbestimmung. So ist im gezeigten Fall das Messsystem in der Lage, einen großen Brechungsindexbereich abzudecken. Der Brechungsindexbereich, der mit dem System messbar ist, ist hauptsächlich durch die Brennweite der Linse bedingt. Bei einem festen Kippwinkel von $\epsilon = 70^\circ$ ist der Einfluss der Brennweite auf die Abbildung der Brechungsindizes in Abbildung 5.14a für $f = 20$ mm, $f = 40$ mm und $f = 100$ mm gezeigt. Die Ergebnisse wurden direkt mit Gleichung (5.11) berechnet und zeigen, auf welcher Höhe die kritischen Winkel der entsprechenden Brechungsindizes abgebildet werden. Die rot schraffierte Fläche gibt den Bereich an, in den die Kamera im gezeigten Versuch mit einer Länge von 28,672 mm und $h_{\text{shift}} = -20,73$ mm platziert wurde. Mit einer größeren Brennweite wird der detektierbare Bereich an Brechungsindizes bei den gewählten Kameradimensionen kleiner, da die Relation weniger steil verläuft. In den vorigen Ergebnissen wurde $f = 40$ mm aus der Fitfunktion bestimmt (rote Kurve). Das experimentell gezeigte Messsystem ist somit in der Lage, Brechungsindizes im Bereich $1,30 - 1,47$ zu ermitteln. Die Limitierung der Auflösung durch die Pixelbreite wird nach Gleichung (5.11) berechnet mit

$$\Delta n(p) = n(p) - n(p-1). \quad (5.12)$$

Die Höhe h auf dem Detektor wird dazu nach Gleichung (5.10) in die Kamerapixel umgerechnet. Abbildung 5.14b zeigt Δn für die genutzten 2048 Pixel (rot schraffierter Bereich in (a)) bei verschiedenen Brennweiten. Durch die geringere Steigung bei größerer Brennweite in (a) wird auch die Genauigkeit verbessert, während diese bei $f = 20$ mm bis auf $\Delta n = 4,0 \cdot 10^{-4}$ ansteigt. Für das verwendete System (rot) liegt die minimale Auflösung zwischen $\Delta n = 0,4 \cdot 10^{-4}$ und $\Delta n = 1,9 \cdot 10^{-4}$.

Zusätzlich zur Variation der Brennweite ist der Einfluss des Kippwinkels ϵ bei einer festen Brennweite von $f = 40$ mm im Detektorbereich in Abbildung 5.14c dargestellt. Die Ergebnisse in (c) zeigen, dass eine

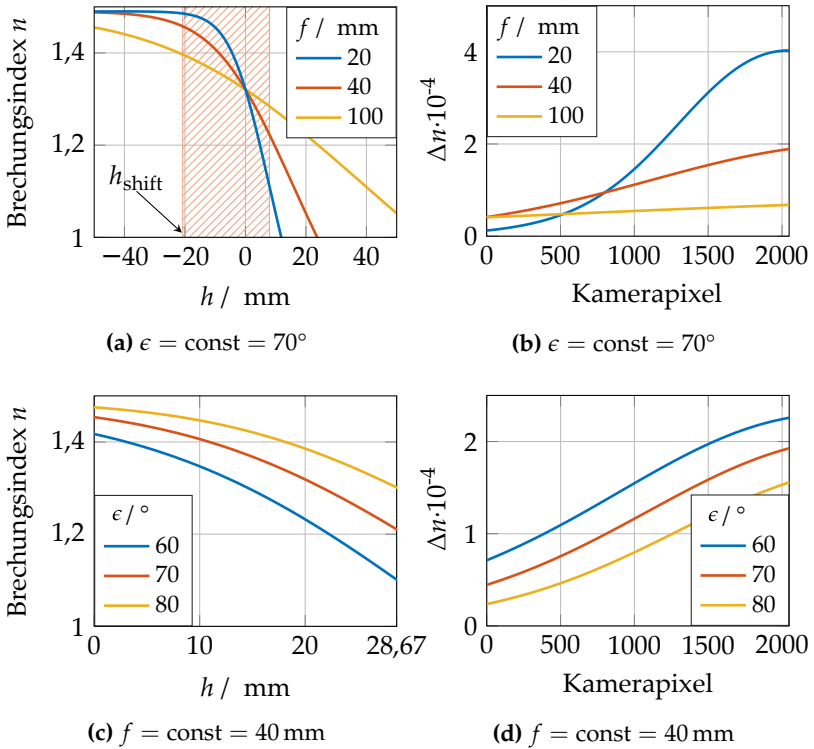


Abbildung 5.14: Zusammenhang von Brechungsindex n zur Abbildung auf die Kamera bei fester variabler Brennweite f (a) und variabler Verkippung ϵ (c). In (b) und (d) ist jeweils die damit verbundene resultierende minimale Auflösung Δn gezeigt.

starke Verkippung in Richtung der Plattenebene von 60° auf 80° im Wesentlichen den Nutzbereich zu größeren Brechungsindizes verschieben. Gleichzeitig wird der Verlauf flacher, sodass mit einem größeren Kippwinkel eine Verbesserung der Auflösung erzielt werden kann (d). Die Ergebnisse zeigen, dass das vorgestellte System durch Optimierung der Komponenten und Reduzierung der zu Beginn des Ab-

schnitts diskutierten Ungenauigkeiten der Prismen und der schlechten Abbildung der Linse deutlich verbessert werden kann, sodass auch Genauigkeiten bis $0,5 \cdot 10^{-4}$ möglich sind. Eine weitere, bisher nicht erwähnte Einschränkung entsteht durch die spektrale Breite der LED. Nach Herstellerangaben strahlt die LED ein Spektrum mit einer Breite von 18 nm (FWHM) bei einer Zentralwellenlänge von 590 nm ab [113]. Die spektrale Breite führt zu einer Beschränkung der Genauigkeit, die von den Dispersionseigenschaften der Probe abhängig ist. So liegt beispielsweise der Brechungsindex von Wasser im hier untersuchten Wellenlängenbereich zwischen $n = 1,3328$ bei $\lambda = 581$ nm und $n = 1,3320$ bei $\lambda = 599$ nm. Die Differenz von $\Delta n = 8 \cdot 10^{-4}$ ist somit deutlich größer als die systematische bedingte Einschränkung der Auflösung und stellt die Obergrenze des Systems bei Verwendung einer breitbandigen LED dar. Hier bleibt zu beachten, dass der Wellenlängeneinfluss bei unterschiedlichen Proben auch unterschiedlich stark ist. Um den Einfluss zu minimieren, kann die LED durch einen schmalbandigen Laser mit der Zielwellenlänge ersetzt werden.

Wird das vorgestellte System mit optimierten Komponenten (schmalbandiger Laser, Optimierung der Kantengenauigkeit der Prismen, Optimierung der Linsenabbildung) umgesetzt, ist die Auflösung nur noch durch die Systematik der Abbildung begrenzt. So können nach den Ergebnissen aus Abbildung 5.14 sowohl die Brennweite als auch der Kippwinkel vergrößert werden, um Auflösungen im Bereich 10^{-5} zu ermöglichen. Aus der Literatur sind Refraktometer bekannt, die basierend auf unterschiedlichen Techniken Auflösungen im Bereich $10^{-6} - 10^{-5}$ erreichen. In [114] ist ein Refraktometer mit einer Auflösung in der Größenordnung von 10^{-5} für Brechungsindizes von 1,33 – 1,56 gezeigt, das auf der Verwendung von optischen Fasern beruht, die in die zu untersuchende Flüssigkeit eingelassen werden. Die Charakterisierung einzelner Tropfen ist damit nicht möglich. Ein auf Totalreflexion basierender Ansatz ist in [115] beschrieben, bei dem

ein Prisma mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt wird. Ähnlich zu dem hier vorgestellten Verfahren wird der Grenzwinkel der Totalreflexion evaluiert und daraus der Brechungsindex verschiedener Salzlösungen im Bereich $1,3327 - 1,3795$ bestimmt. Der kritische Winkel wird durch Rotation des Prismas ermittelt, sodass das System nicht statisch auf andere Anwendungen wie die Überwachung von Schutzscheiben übertragen werden kann. Ein auf der Ausnutzung von ausgedehnten Platten als Wellenleiter beruhendes Verfahren wird in [111] vorgestellt. Dort wird bei festem Einkoppelwinkel Licht über Prismen in eine Quartz-Platte ein- und ausgekoppelt und propagiert mittels mehrfacher Totalreflexionen durch die Platte. Durch den festen Winkel wird keine Winkelverteilung, sondern lediglich der gesamte Verlust, der durch die Benetzung mit Zuckerlösungen entsteht, ausgewertet. Dadurch kann eine Auflösung bis $3 \cdot 10^{-5}$ für Zuckerlösungen im Bereich $n = 1,3330 - 1,3342$ erzielt werden. Das System beruht allerdings auf der Verwendung von sehr dünnen Wellenleitern mit einer Dicke im Bereich $100 \mu\text{m}$ und ist nicht auf dickere Platten übertragbar.

Die gezeigten Methoden unterscheiden sich somit meist in der Anwendbarkeit auf das in dieser Arbeit betrachtete Problem zur Erkennung von Verunreinigungen auf LiDAR-Schutzscheiben. Die hier vorgestellte Methode eignet sich insbesondere aus Gründen der einfachen Implementierung in LiDAR-Systeme besonders gut für die benötigte Funktion. Unabhängig von der Form der Schutzscheibe ist das Refraktometer einfach integrierbar, indem Prismenstrukturen an den Außenkanten angebracht werden. Je nach LiDAR-Typ kann dann analog zu den gezeigten Ergebnissen in Kapitel 4.3 die Bewegung der Sensorkomponenten (bei rotierenden LiDAR-Scannern) mit der Bewegung der hier notwendigen Komponenten gekoppelt werden. Die Charakterisierung des Brechungsindex anhaftender Verunreinigungen kann dann über die gesamte Schutzscheibenoberfläche erfolgen.

5.1.4 REALE BEDINGUNGEN

Die bisherigen Ergebnisse sind lediglich auf die Charakterisierungen von Zuckerlösungen beschränkt, deren Brechungsindex sich mit der Zuckerkonzentration ändert. Die Zuckerlösungen dienen hier nur der Kalibrierung und anschließender Validierung des vorgestellten Systems. In diesem Abschnitt soll der Bezug zu LiDAR-Systemen im Straßenverkehr gemacht werden, die anderen Verunreinigungen ausgesetzt sind. In Tabelle 4.2 wurden bereits die Brechungsindizes fester Verunreinigungen wie Salz und Staub angegeben, die alle oberhalb des Brechungsindex der PMMA-Platte liegen. Das Refraktometer kann diese nicht direkt bestimmen, sondern lediglich als $n > n_{\text{PMMA}} = 1,49$ klassifizieren. Die Brechungsindizes vieler Flüssigkeiten liegen hingegen im Messbereich des Refraktometers von $1,30 - 1,47$. Neben der häufigsten Verunreinigung Wasser zählen dazu Kraftstoffe, Öle und Reinigungsflüssigkeiten, deren Brechungsindizes einen großen Wertebereich annehmen können. Die notwendige Information zur Steuerung eines Reinigungssystems hängt von der Art des Systems ab. Die allgemein etablierte Methode als Kombination aus Scheibenwischer und Spritzdüsen benötigt zusätzlich zum Verschmutzungsgrad, der die Wischgeschwindigkeit steuert, auch Information über die Art der Verunreinigung. So werden bei Vorhandensein von Wasser zur Einsparung von Spritzwasser nur die Scheibenwischer ausgelöst, während bei Anlagerung fester Materialien zusätzliches Spritzwasser automatisch aufgebracht werden muss.

Der Test des Refraktometers wird deshalb auf die wesentliche Differenzierung zwischen Wasser und festen Verunreinigungen beschränkt. Als feste Verunreinigung wird der bereits in Tabelle 4.2 gezeigte Normstaub verwendet, der in einer Wasserlösung aufgetragen wird. Die Messung erfolgt dann nach dem Austrocknen des Wassers, sodass nur der anhaftende Staub auf der Platte bleibt. Vor Auftragen der Verun-

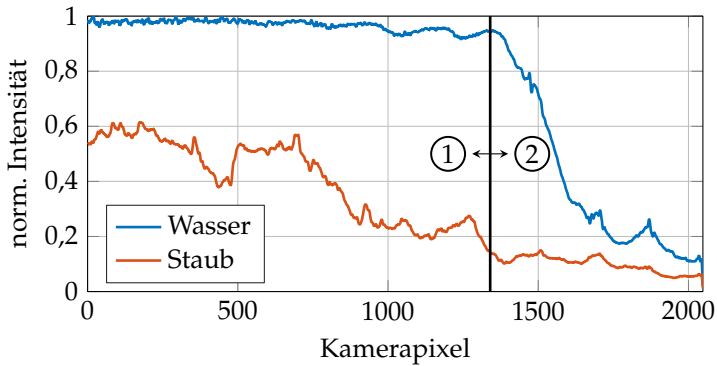


Abbildung 5.15: Normierte Intensität des Kamerabildes bei anhaftenden Tropfen (blau) und getrockneter Normstaublösung (rot). Während Wasser zu der bekannten Charakteristik mit kritischem Pixel bei $p_{\text{krit}} = 1340$ führt, entsteht für den Normstaub ein Verlust über die gesamte Kamerazeile.

reinigung wird wie im vorherigen Abschnitt eine Referenzmessung des Systems durchgeführt, die zur Normierung der Messdaten genutzt wird. Der Vergleich zwischen anhaftenden Wassertropfen und Normstaub ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Wasser (blau) zeigt dabei den bisher bekannten Verlauf von Totalreflexion (kein Verlust) bis zu einem steilen Abfall der Intensität in den Verlustbereich ab dem Grenzpixel bei $p_{\text{krit}} = 1340$. Der anhaftende Staub mit Brechungsindex oberhalb dessen von PMMA resultiert hingegen in einem Verlust über die gesamte Kamerazeile hinweg.

Da sich andere feste Verunreinigungen aufgrund des ebenfalls hohen Brechungsindex ähnlich verhalten, kann die Steuerung des Scheibenwischers und der Spritzdüsen auf eine einfache Unterscheidung heruntergebrochen werden. Die Kamera wird dazu in zwei Bereiche (1) und (2) eingeteilt, die in Abbildung 5.15 durch die vertikale Linie am Grenzpixel getrennt werden. Die Auswertung erfolgt dann durch

Betrachtung der normierten Summe über alle Intensitätswerte in den beiden Bereichen nach

$$I_1 = \frac{1}{p_{\text{krit}}} \sum_{p=1}^{p_{\text{krit}}} I, \quad I_2 = \frac{1}{2048 - p_{\text{krit}}} \sum_{p=p_{\text{krit}+1}^{2048} I, \quad (5.13)$$

wobei $p_{\text{krit}} = 1340$ hier den kritischen Pixel für den Übergang von PMMA zu Wasser beschreibt. Für die dargestellte Messung ergibt sich $I_1 (\text{H}_2\text{O}) = 0,97$, $I_2 (\text{H}_2\text{O}) = 0,39$, $I_1 (\text{Staub}) = 0,39$ und $I_2 (\text{Staub}) = 0,09$. Der Wert im oberen Bereich I_1 kann dann zur Unterscheidung genutzt werden, I_2 hingegen zur Bestimmung des Verschmutzungsgrades. Mit I_2 wird zuerst definiert, ob eine Verunreinigung vorliegt. Liegt gleichzeitig I_1 unterhalb eines gewissen Schwellwertes, so muss der Brechungsindex der anhaftenden Kontaminationen größer als der Brechungsindex von Wasser sein. Der Schwellwert wird abhängig vom Maximalwert bestimmt, der ohne Verlust genau dem Wert 1 entspricht. Da die anhaftenden Wassertropfen aufgrund von Ungenauigkeiten dennoch zu einem Verlust führen können (hier auf $I_1 = 0,97$), muss der Schwellwert entsprechend angepasst werden. Für den hier gezeigten Fall kann als Schwellwert $I = 0,95$ festgelegt werden. Bei beiden Messungen weisen die Werte von I_2 auf eine vorhandene Verschmutzung hin. Im Falle anhaftender Wassertropfen (blau) liegt I_1 oberhalb des Schwellwertes, sodass auf Wasser geschlossen werden kann. Für die zweite Messung mit Staub (rot) hingegen wird der Schwellwert unterschritten, sodass auf das Vorhandensein von Verunreinigungen mit größerem Brechungsindex geschlossen wird.

Die Auftrennung der Winkelverteilung in zwei entscheidende Bereiche liefert somit die Möglichkeit, ein kombiniertes Wischer-Spritzdüsen System intelligent zu regulieren. Da Wasser die entscheidende Verunreinigung für die Regulierung ist, muss das System speziell auf den Grenzwinkel der Totalreflexion für den Übergang von PMMA zu Wasser ausgelegt werden. Die Integration bzw. die Summe über die

Werte in den dabei entstehenden Bereichen kann dann zur Auswahl des Reinigungsmodus genutzt werden. In Kapitel 4.3 wurde bereits ein TIR-basierendes Konzept zur Schmutzdetektion vorgestellt, das den Verschmutzungsgrad entlang der Bewegungsrichtung des Sensors auflösen kann. Im folgenden Kapitel wird deshalb das Ziel verfolgt, diese Ortsauflösung mit den Ergebnissen der Charakterisierung der Verunreinigungen zu verknüpfen. Dabei sollen die Ergebnisse aus der refraktometrischen Betrachtung so vereinfacht werden, dass die Kamera durch eine geschickte Platzierung zweier Photodioden ersetzt wird, die automatisch die Integration über die Intensitätsverteilung in den beiden definierten Bereichen messen. Neben der Reduzierung der Komplexität ist dabei auch eine erhebliche Reduzierung der Systemkosten verbunden. Zusätzlich soll die Linse im System ausgelassen werden. Eine Folge wäre eine deutliche Reduzierung der Auflösung in der Brechungsindexbestimmung. Da eine hohe Auflösung durch die Limitierung auf die Unterscheidung zwischen Wasser und anderen Verunreinigungen nicht benötigt wird, können weitere Kosten gespart werden.

5.2 VOLLAUTOMATISIERTES REINIGUNGSSYSTEM

Die Reflexionsbedingungen für die Ausbreitung von elektromagnetischer Strahlung in einem Lichtleiter sind nach den Fresnel-Gleichungen (5.2) vollständig durch den Brechungsindex des Lichtleiters sowie des äußeren Mediums bedingt. Für die Nutzung des Prinzips zur Schmutzerkennung bleibt der Brechungsindex des inneren Mediums unverändert, sodass der äußere Brechungsindex als variable Größe die Reflexionseigenschaften bestimmt. Im vorherigen Kapitel wurde der aus anhaftenden Verunreinigungen resultierende Signalverlust bereits ausführlich beschrieben. Dabei wurde gezielt

der Zusammenhang des Propagationswinkels nahe des kritischen Winkels mit dem Brechungsindex des äußeren Mediums untersucht. Durch die Bestimmung des Brechungsindex werden die optischen Eigenschaften des äußeren Mediums beschrieben, mit denen direkte Rückschlüsse auf das Medium selbst geschlossen werden können. In diesem Kapitel soll die Kenntnis über das Medium genutzt werden, um ein Reinigungssystem bestehend aus einer Kombination von Scheibenwischer und Spritzdüsen vollautomatisch zu steuern. Erste Ansätze dazu wurden bereits im vorherigen Kapitel beschrieben. Die Kenntnis über den exakten Brechungsindex ist dabei allerdings nicht immer notwendig, da die Steuerung der Reinigung in wenige Modi eingeteilt werden kann:

1. keine Verunreinigungen → keine Reinigung
2. Verunreinigung = flüssig → Reinigung durch Scheibenwischer
3. Verunreinigung = fest → Auftragen von Reinigungsflüssigkeit mit Spritzdüsen, danach Auslösen der Scheibenwischer

Eine Mischung von flüssigen und festen Verunreinigung wird vorerst nicht untersucht und kann generell in den zweiten Punkt eingeordnet werden, da die vorhandene Flüssigkeit die Reinigungslösung möglicherweise ersetzen kann.

Aus der Erfahrung im Straßenverkehr bildet Wasser die häufigste Verunreinigung, die sowohl durch Regen als auch durch Aufwirbelungen von der Straße auf dem Sensor anhaften kann. Befindet sich Wasser auf der Sensoroberfläche, so reicht in der Regel die Reinigung mittels Scheibenwischern aus. In den vorherigen Kapiteln wurden bereits Staub, Salz und Pollen als weitere häufige Verunreinigungen angegeben. Haftet eine dieser festen Verunreinigungen an, so ist die Auftragung einer zusätzlichen Reinigungsflüssigkeit vor der Nutzung der Scheibenwischer notwendig. Welche feste Verunreinigung genau vorliegt, ist für die Auswahl des Reinigungsmodus nicht relevant. Die

Identifikation, dass es sich bei der Kontamination nicht um Wasser handelt, ist bereits hinreichend für die Reinigungsentscheidung. Da andere Flüssigkeiten als Wasser nur in seltenen Fällen als Kontamination auftreten, wird die Charakterisierung in diesem Kapitel auf die Unterscheidung zwischen Wasser und festen Verunreinigungen limitiert. Diese Limitierung kann mit den Ergebnissen aus dem vorherigen Kapitel verknüpft werden und erlaubt die Einsparung mehrerer kostspieliger Komponenten inklusive Linse und Linienkamera.

Die Unterscheidung ist durch die Abgrenzung der optischen Eigenschaften von Wasser zu denen der anderen Verunreinigungen bestimmt. In Tabelle 4.2 wurden bereits die Brechungsindizes der genannten Verunreinigungen angegeben. Die Reflexionseigenschaften für die Ausbreitung von Licht in PMMA mit den äußeren Brechungsindizes der Kontaminationen für Wasser, Salz und Staub (dargestellt durch SiO_2 als Hauptbestandteil) werden durch die Fresnel-Gleichungen (5.2) und die Reflektivität in Gleichung (5.4) beschrieben. Abbildung 5.16 zeigt die Reflektivität R für alle möglichen Übergänge von PMMA zu den genannten Kontaminationen und zu Luft (saubere Platte). Die blaue Kurve begrenzt den Nutzbereich der Winkelverteilung zu kleinen Propagationswinkeln hin. Für den Übergang von PMMA zu SiO_2 oder Salz mit $n = 1,54$ entsteht keine Totalreflexion. Für den Übergang von PMMA zu Wasser (rot) liegt der Grenzwinkel der Totalreflexion bei $\alpha_{\text{c,H}_2\text{O}} = 63,2^\circ$. Durch diesen Übergang wird die Winkelverteilung in zwei entscheidende Bereiche unterteilt:

- ① $\alpha_{\text{c,Luft}} = 42,2^\circ < \alpha < 63,2^\circ = \alpha_{\text{c,H}_2\text{O}}$
- ② $\alpha_{\text{c,H}_2\text{O}} = 63,2^\circ \leq \alpha$

Der Sensor ist somit sensitiv bezüglich Wasser für alle Propagationswinkel unterhalb $\alpha_{\text{c,H}_2\text{O}}$ und unbeeinflusst für alle Propagationswinkel oberhalb $\alpha_{\text{c,H}_2\text{O}}$. Die Gültigkeit dieser Aussage ist allein auf die Kontamination durch Wasser (beziehungsweise den optischen Übergang zu

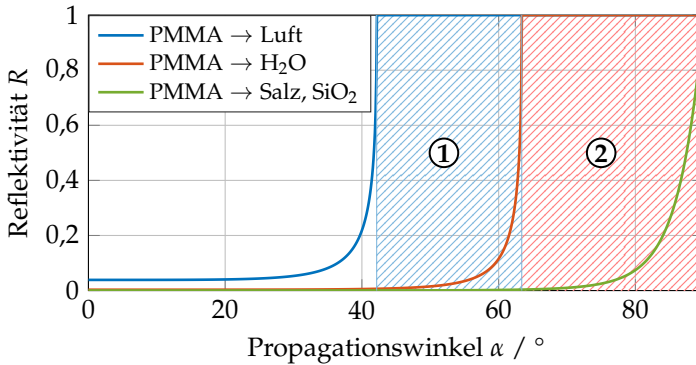


Abbildung 5.16: Reflektivität R in Abhängigkeit des Propagationswinkels α für unterschiedliche Übergang von PMMA zu Luft und zu anhaftenden Verunreinigungen. Durch den Grenzwinkel der Totalreflexion von PMMA zu Wasser α_{c,H_2O} wird die Winkelverteilung in zwei Bereiche unterteilt.

Materialien mit $n = 1,33$) beschränkt und gilt nicht für Verunreinigungen mit $n > n_{H_2O}$, da in diesen Fällen auch bei hohen Propagationswinkeln keine Totalreflexion auftritt.

Die Simulation der Lichtausbreitung in der Platte im Anhang A.2 zeigt eine alternierende Intensitätsverteilung nach der Auskopplung. Durch die Simulation wird außerdem sichtbar, dass die Intensitätsverteilung nicht direkt als Winkelverteilung interpretiert werden kann, da die Winkelbereiche auf dem Schirm überlappen. Die Überlappung wurde in Kapitel 5.1 durch die Zylinderlinse aufgehoben. Zur Reduzierung der Systemkomplexität und -kosten soll auf die Linse nun verzichtet werden. Abbildung 5.17 zeigt den Einfluss auf die Intensitätsverteilung durch die Aufbringung von Wassertropfen (links) und Normstaub (rechts) auf einer PMMA-Platte. Die LED (vorne) strahlt im gezeigten Aufbau sowohl in vertikaler als auch horizontaler Richtung divergent in die Platte ein, um den Einfluss beider Kontaminationen gleichzeitig betrachten zu können. Der Schirm im Abstand von 9 cm

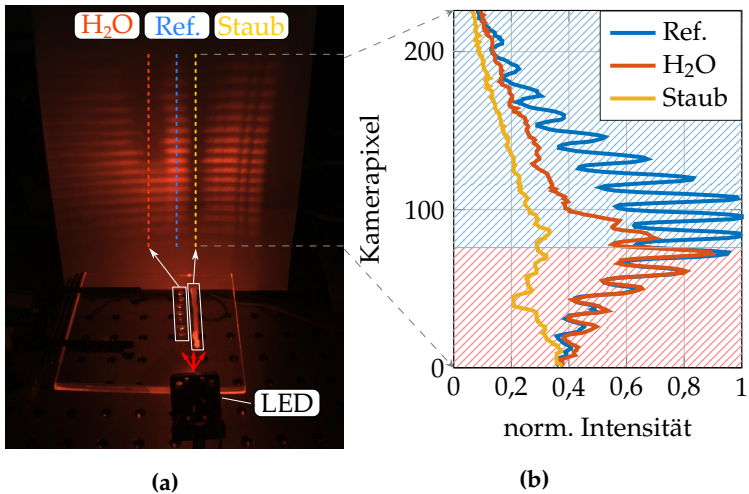


Abbildung 5.17: Einfluss von Wasser und Staub auf das Intensitätsmuster auf einem Schirm in 9 cm Abstand nach Propagation von divergentem Licht durch eine 3 mm dicke PMMA-Platte. Während sich die Auskopplung bei Staub über den gesamten Schirm erstreckt, entsteht bei Wasser der vorab beschriebene Übergang von Totalreflexion zu verlustbehafteter Reflexion.

zum Plattenende zeigt die bekannte Intensitätsverteilung, die mit zwei Schattenbereichen überlagert ist. Diese Schattenbereiche definieren die durch die jeweiligen Verunreinigungen induzierte Auskopplung. Während beide Schattenbereiche zum oberen Schirmende hin (entspricht kleineren Propagationswinkeln) bis zum Ende ausgeprägt sind, ist der linke Bereich nach unten hin begrenzt und geht in die unbeeinflusste Intensitätsverteilung über. Zur besseren Sichtbarkeit sind in (b) die Intensitätswerte entlang der gestrichelten Linien dargestellt. Im durch Wasser resultierenden Verlustbereich überlappt die Intensität im unteren Bereich mit der Referenzintensität (blau), bis sie ca. ab Pixel 76 einbricht. Diese Stelle entspricht genau der definierten Grenze für die Einteilung in die beiden in Abbildung 5.16 definierten Nutzerei-

che. Für den durch Staub kontaminierten Bereich erstreckt sich der Intensitätsverlust über die gesamte Schirmlänge. Die Intensitätsverläufe decken sich somit mit den Ergebnissen des Refraktometers in Abbildung 5.15. Ein wesentlicher Unterschied liegt darin, dass der Übergang der beiden Bereiche durch die Überlappung der Winkel auf dem Schirm nicht mehr scharf definiert ist. Die Platzierung zweier Photodioden in die beiden Bereiche muss allerdings exakt erfolgen, sodass insbesondere im rot markierten Bereich kein Einfluss auf das Messsignal bei Vorhandensein von Wassertropfen entsteht. Im folgenden Abschnitt wird die Auslegung des Schmutzdetektionssystems genau beschrieben, die die Trennung der beiden Bereiche ermöglicht. Im Anschluss wird das Design des Wischersystems vorgestellt, das an das Schmutzdetektionssystem gekoppelt werden kann.

5.2.1 SYSTEMAUSLEGUNG I: SCHMUTZDETEKTION

Das in diesem Kapitel vorgestellte System zur Schmutzdetektion erweitert das bereits beschriebene System aus Kapitel 4.3 um die Charakterisierung der Verunreinigungen nach der zuvor genannten Einteilung. Der Versuchsaufbau soll somit die lineare Ortsauflösung des Verschmutzungsgrades aus dem Aufbau in Abbildung 4.12 mit der Aufspaltung der vertikalen Winkelverteilung verknüpfen. Um zusätzlich eine Reinigung mittels Scheibenwischern zu integrieren, werden die schrägen Kanten zur Einkopplung durch Aufkleben von Prismen aus PMMA entlang der Bewegungsrichtung ersetzt. Eine Querschnittsübersicht ist in Abbildung 5.18 gezeigt. Die beiden Prismen ermöglichen die Kopplung von der Unterseite der Platte, sodass auf der Oberseite ein Scheibenwischer ungestört arbeiten kann. Zwischen den Prismen propagiert die Strahlung unter verschiedenen Winkeln, die durch die Kombination von LED und Diffusor erzeugt wird, durch

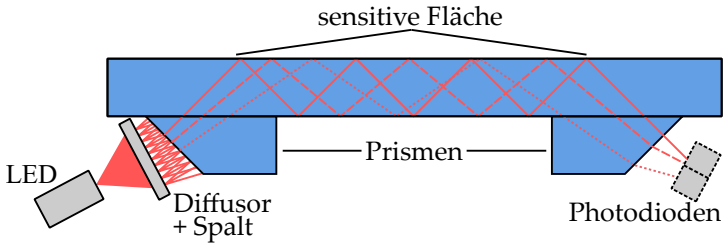


Abbildung 5.18: Aufbau des Schmutzdetektionssystems im Querschnitt. Die schrägen Kanten werden durch Aufkleben von Prismen ersetzt.

die Platte. Die sensitive Fläche ist dann durch den Bereich zwischen den beiden Prismen definiert. Da die Unterscheidung von Wasser und anderen Verunreinigungen durch die Auftrennung der Winkelbereiche erreicht werden kann, müssen die Prismen und die Platzierung der Photodioden genau ausgearbeitet werden. Dazu werden zunächst die Prismenlänge und der Abstand der Prismen untersucht, bevor die Auskoplung auf die Verteilung beider Photodioden ausgelegt wird.

Die Geometrie der Prismen wird für die Propagation der Strahlung unter dem kritischen Winkel für den Übergang von PMMA zu Wasser α_{c,H_2O} optimiert. Alle verwendeten Parameter sind in Abbildung 5.19 skizziert. Dabei werden der Prismenwinkel mit 45° und die Prismendicke $d_{pr} = d_{pl} = 3 \text{ mm}$ aufgrund der Verfügbarkeit festgesetzt. Die Prismenlänge l_{pr} bestimmt, welche Strahlen in die Platte einkoppeln können. Dabei ist zu beachten, dass Strahlen mit großem Propagationswinkel an der flachen Außenkante der Prismen auskoppeln können. Bei zu großer Wahl der Prismenlänge können Strahlen mit kleinem Propagationswinkel an der Plattenoberfläche zurück in das Prisma reflektieren und dort an einer Grenzfläche auskoppeln oder die Richtung in der Platte ändern. Die Länge des Einkoppelbereichs des Prismas ist durch die vorgegebene Geometrie der Platte ebenfalls definiert und entspricht $l_1 = 3 \text{ mm}$. Die Länge l_2 wird so gewählt, dass Strahlen

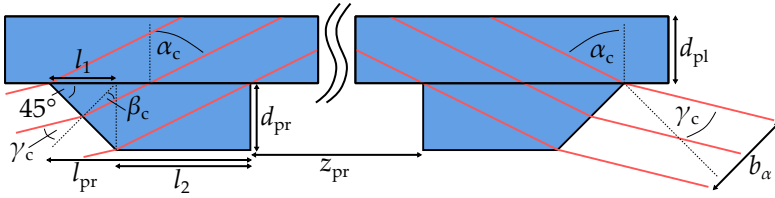


Abbildung 5.19: Seitenansicht der aufgeklebten Prismen und deren Geometrie. Die Prismenlänge l_{pr} sowie der Abstand der Prismen z_{pr} werden für die Propagation der Strahlung mit Propagationswinkel α_{c,H_2O} definiert.

mit Propagationswinkel α_{c,H_2O} von jedem Punkt der Einkopplfläche verlustfrei in die Platte einkoppeln können. Die gesamte Länge des Prismas ist dann gegeben durch

$$l_{pr} = l_1 + l_2 = 3 \text{ mm} + \frac{d_{pr}}{\tan(90^\circ - \alpha_{c,H_2O})} = 8,9 \text{ mm}. \quad (5.14)$$

Der Abstand der Prismen ist prinzipiell durch die vom zugrundeliegenden LiDAR-Sensor definierte Schutzscheibengeometrie vorgegeben. Dennoch kann eine Anpassung dieses Abstandes sinnvoll sein, um die Auskoppplung zu optimieren. Die Auskoppplfläche des zweiten Prismas wird nur dann von dem unter α_{c,H_2O} propagierenden Strahlenbündel vollständig getroffen, wenn der Gesamtabstand z_{pr} genau einem ganzzahligen Vielfachen der Strecke zwischen aufeinanderfolgenden Reflexionen auf der Oberseite in der Platte entspricht (Abbildung 5.19). Der Abstand zweier Reflexionen auf gegenüberliegenden Seiten ist bereits durch l_2 definiert, sodass

$$z_{pr} = 2N_{pr}l_2, \quad N_{pr} \in \mathbb{N} \quad (5.15)$$

den optimalen Prismenabstand beschreibt. In dieser Arbeit wird $N_{pr} = 7$ gewählt, sodass die Prismen im Abstand $z_{pr} = 82,6 \text{ mm}$ aufgeklebt werden. Die Strecke z_{pr} definiert gleichzeitig auch den sensitiven Bereich für die Schmutzdetektion entlang der Propagationsrichtung.

Die Länge der Prismen entlang der Einkoppelfläche (in die Zeichenebene hinein) wird auf 10 cm festgesetzt. Die Prismen werden mit einem transparenten Kleber mit $n_{\text{kl}} = 1,54$ auf die PMMA-Platte geklebt. Durch den geringen Brechungsindexunterschied zwischen Kleber und PMMA ist der entstehende Strahlversatz bei dem Übergang vom Prisma (PMMA) in die Platte (PMMA) durch den Kleber hindurch mit 0,07 mm bei $\alpha = \alpha_{\text{c,H}_2\text{O}}$ vernachlässigbar klein.

Zur Reduzierung von Hintergrundlichteinflüssen werden die planen Seiten der Prismen gegenüber der Einkoppelfläche mit schwarzem Klebeband abgeklebt. Dadurch wird insbesondere bei der Einkopplung verhindert, dass Licht durch diese Außenflächen unterhalb der Platte die Photodioden erreichen kann. Der Teil der Strahlung innerhalb der Platte, der nicht auf das Auskoppelprisma trifft und somit weiter durch die Platte propagiert, kann an Störstellen wie Kratzern streuen und ein von der Restintensität abhängiges Störsignal erzeugen. Um dies zu verhindern, wird die Unterseite der Platte nach dem Auskoppelprisma ebenfalls mit schwarzem Klebeband abgedunkelt.

Nach der Auskopplung müssen die beiden Photodioden zur Trennung der in Abbildung 5.16 und Abbildung 5.17 definierten Bereiche so platziert werden, dass die erste Photodiode keinen durch Wasser induzierten Signalverlust messen kann, während die zweite Photodiode insgesamt möglichst viel Leistung aufnehmen kann, ohne die erste wiederum zu stören. Die Schwierigkeit bei der Platzierung ist die Überlappung der Auskopplung von Strahlenbündeln unterschiedlicher Propagationswinkel. Dadurch können die beiden Winkelbereiche nicht direkt voneinander getrennt werden, sodass ein gewisser Signalverlust toleriert werden muss. Zur Erläuterung ist die Auskopplung in Abbildung 5.20 dargestellt. Der rot markierte Abschnitt zeigt die Auskopplung des gesamten Strahlenbündels bei Propagationswinkel $\alpha_{\text{c,H}_2\text{O}} = 63,2^\circ$. Mit größerem Propagationswinkel kippt dieser Bereich

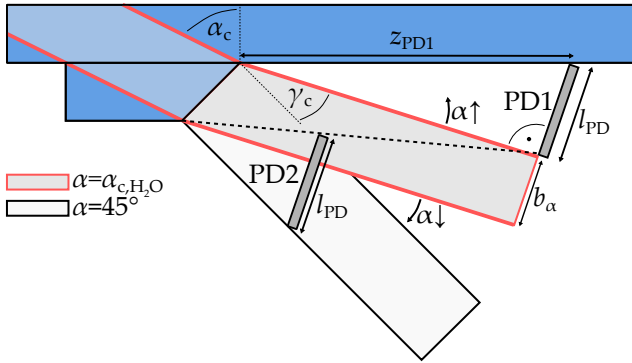


Abbildung 5.20: Positionierung der beiden Photodioden PD1 und PD2 zur Trennung der vorab definierten Winkelbereiche. Während PD1 von der Auskopplung der Lichtverteilung mit $\alpha = \alpha_{c,H_2O}$ getrennt werden muss, kann PD2 möglichst viel vom Restsignal einfangen, ohne PD1 zu verdecken.

zur Platte hin, mit kleinerem Propagationswinkel von der Platte weg. Die erste Photodiode PD1 wird oberhalb des rot markierten Bereiches platziert, der nicht von Strahlen mit Propagationswinkeln kleiner gleich α_{c,H_2O} erreicht wird. Der von PD1 gemessene Strahlungsanteil ist dann sehr gering, da auch Strahlen mit größerem Propagationswinkel bei Auskopplung im unteren Bereich des Prismas im rot markierten Bereich propagieren und somit PD1 nicht erreichen. Die Photodioden werden hier analog zur Einkopplung senkrecht zum kritischen Winkel α_{c,H_2O} platziert, der an der Auskoppelfacetten zu γ_{c,H_2O} gebrochen wird. Der notwendige Abstand z_{PD1} von der oberen Kante der Photodiode zur Spitze des Auskoppelprismas hängt von der Länge der Photodioden l_{PD} ab gemäß

$$z_{PD1} = \frac{l_{PD}}{\sin(45^\circ - \gamma_{c,H_2O})}. \quad (5.16)$$

Strahlenbündel unterschiedlicher Winkel überschneiden sich vollständig unmittelbar nach der Auskopplung und trennen sich ab-

hängig vom Winkelunterschied mit größerer Entfernung immer weiter voneinander. Um einen hohen Abstand z_{PD1} zu erreichen, wird die Länge der Photodiode l_{PD} deshalb möglichst groß gewählt. Dazu werden die bereits in Kapitel 4.3 eingesetzten Photodioden (Hamamatsu S2387-16R) mit einer Länge von 15 mm und einer Breite von 2,7 mm verwendet. Da die photosensitive Fläche (wie in Abbildung 4.14 erkennbar) nur 5,9 mm der Gesamtlänge ausmacht, werden die Randbereiche so nah wie möglich zur sensitiven Fläche hin abgeschnitten, sodass die Gesamtlänge auf $l_{PD} = 10,3$ mm reduziert wird. Die in Abbildung 5.20 dargestellte Länge l_{PD} entspricht hier also der gesamten Länge der Photodiode und nicht der Länge der sensitiven Fläche. Daraus folgt für den Abstand $z_{PD1} = 34,6$ mm mit $\gamma_{c,H_2O} = \sin^{-1}(n_p \sin(\alpha - 45^\circ)) = 27,7^\circ$. Der Abstand z_{PD1} definiert den Mindestabstand für PD1. Bei einer Platzierung mit einem größeren Abstand werden ebenfalls nur der gewünschte Winkelbereich aufgefangen, allerdings steigt der Signalverlust mit Entfernung zum optimalen Abstand weiter an. Man beachte, dass Strahlenbündel mit geringfügig größerem Propagationswinkel als α_{c,H_2O} nur teilweise von der ersten Photodiode detektiert werden können. Der übrige Anteil kann entweder von der zweiten Photodiode detektiert oder als Verlust toleriert werden.

Zur Unterscheidung der anhaftenden Verunreinigungen wird der Vergleich der Signale beider Photodioden benötigt. Da die zweite Photodiode PD2 einen großen Winkelbereich abdecken kann, wird diese zusätzlich zur Bestimmung des Verschmutzungsgrades verwendet. Die Positionierung von PD2 ist dabei weniger kritisch als die der ersten Photodiode, da kein Winkelbereich abgetrennt werden muss. Das Ziel ist es, so viel Strahlung wie möglich aufzufangen, ohne dabei die erste Photodiode abzuschatten. Bei einer Positionierung mit gleichem Abstand zur Auskoppelfacetten würde der Großteil der gesamten Strahlungsleistung nach unten hin an der Photodiode vorbei

propagieren. Die Photodiode wird deshalb weiter zum Prisma hin verschoben. Die gestrichelte Linie in Abbildung 5.20 zeigt die obere Grenze, ab der PD2 das Signal von PD1 beeinflusst. Besonders vorteilhaft ist die in der Abbildung dargestellte Positionierung, bei der nach oben hin die gestrichelte Linie die Grenze definiert und nach unten hin die Propagation mit $\alpha = 45^\circ$ vollständig detektiert wird. Damit wird die geringe Strahlungsleistung an PD1 nicht abgeschwächt und gleichzeitig die Strahlungsleistung einer homogenen Winkelverteilung in der Platte detektiert. Alternativ kann die zweite Photodiode auch horizontal (in die Bildebene hinein) versetzt zur ersten Photodiode und nah an der Auskoppelfacetten angeordnet werden. Durch den horizontalen Versatz wird PD1 nicht beeinflusst, PD2 funktioniert dann analog zur Beschreibung in Kapitel 4.3 und detektiert die komplette Lichtverteilung. Die Wege zwischen LED und Photodiode sind dann allerdings unterschiedlich, sodass der Vergleich der beiden Photodioden korrigiert werden muss. Im hier vorgestellten System wird die Photodiode deshalb nicht horizontal versetzt.

Die beiden Photodioden werden zur Justage auf eine im 3D-Druck hergestellte Halterung aufgeklebt, die die Positionierung der oberen Photodiode direkt unterhalb der Plattenoberfläche und gleichzeitig eine Verschiebung der zweiten Photodiode bezüglich Höhe und Distanz erlaubt (Abbildung 5.21a). Beide Photodioden werden mit einem Transimpedanzverstärker gemäß Abbildung 4.14 mit variabler Verstärkung verschaltet und an eine Datenerfassungskarte (NI USB-6216 von National Instruments, 16 bit, 400 kS/s) angeschlossen, die die Signale auf den Messrechner überträgt. Als Lichtquelle wird eine rote LED bei 610 nm mit einer Strahlungsleistung von 8 mW verwendet. Das Licht trifft unmittelbar hinter der LED auf einen Diffusor (Thorlabs ED1-L4100), der eine homogene Intensitätsverteilung in einem Winkelbereich von 100° in vertikaler Richtung erzeugt. Der Diffusor schließt nach oben hin flach mit der Halterung ab, damit dieser bis direkt

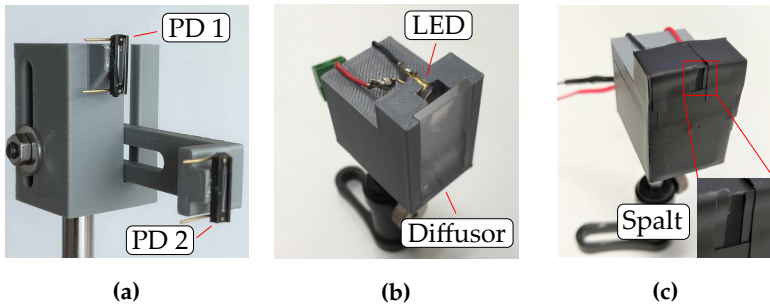


Abbildung 5.21: Zur optimalen Trennung der definierten Winkelbereiche werden die Photodioden in Höhe und Abstand voneinander getrennt (a). Verwendete LED mit Diffusor zur Erzeugung einer homogenen Lichtverteilung in der Platte (b). Die horizontale Divergenz wird durch Aufkleben einer Spaltblende reduziert (c).

an die Oberkante der Platte zur Einkopplung vor dem Prisma platziert werden kann (Abbildung 5.21b). Die von der Divergenz der LED stammende horizontale Ausbreitung wird durch Aufkleben einer Spaltblende reduziert, um Streulichteinflüsse im System zu verringern (Abbildung 5.21c). Die Wahl der Sendekomponenten erfolgt aus Gründen der Verfügbarkeit. Generell kann eine beliebige LED mit der Zielwellenlänge verwendet werden. Der vom Diffusor erzeugte Divergenzbereich von 100° ist deutlich größer als der notwendige Winkelbereich zur Erzeugung der gewünschten Winkelverteilung in der Platte. Die Strahlungsanteile mit zu großen beziehungsweise zu kleinen Winkeln reflektieren als Verlustanteil an der Einkopplungsfacetten, wirken sich aber nicht auf das Messsignal aus.

Alle zur Schmutzdetektion notwendigen Komponenten werden unterhalb der Platte platziert, sodass der Scheibenwischer die Oberseite reinigen kann. Das System wird an eine lineare Bewegung gekoppelt, die im nächsten Abschnitt zusammen mit dem Reinigungssystem genauer vorgestellt wird, bevor erste Testmessungen gezeigt werden.

5.2.2 SYSTEMAUSLEGUNG II: KOMBINATION MIT REINIGUNGSSYSTEM

In diesem Kapitel wird ein einfaches Wischersystem in den Aufbau integriert, um den gesamten Reinigungsprozess bestehend aus Schmutzdetektion, Datenanalyse und Reinigung zu testen. Für die Schmutzdetektion wurde bereits in den vorherigen Kapiteln die Rotation eines LiDAR-Scanners durch eine alternative lineare Bewegung entlang einer Platte beschrieben. Auf der Oberseite der Platte, auf der auch die Verunreinigungen aufgetragen werden, wird somit ebenfalls ein linear beweglicher Scheibenwischer verwendet. Die zur vollautomatisierten Reinigung notwendigen Spritzdüsen werden in dieser Arbeit nicht integriert, da der Fokus auf die Schmutzdetektion gelegt wird. Für das Wischersystem wird eine Linearachse verwendet, auf der ein Schlitten mit einem Riemenantrieb bewegt wird. Der Riemen ist über eine Zahnriemenscheibe an einen Schrittmotor gekoppelt. Über ein Mikrocontrollerboard (Arduino Uno) erfolgt die Motorsteuerung, sodass der Fahrweg und die Wischgeschwindigkeit angepasst werden können. Der Wischerarm wird an den Schlitten gekoppelt und kann somit über die Linearführung verfahren werden. Das am Wischerarm befestigte Wischblatt mit einer Länge von 15 cm wird über den Arm auf die Oberseite der Platte angepresst. Abbildung 5.22 zeigt eine Skizze des linear beweglichen Wischersystems auf der Oberseite der Platte. Durch den Fahrweg von 20 cm wird ein 20 cm × 15 cm großer Bereich auf der Platte gereinigt (grün gestrichelt). Der Reinigungsbereich wird so ausgelegt, dass die Reinigung den Bereich der Schmutzdetektion (rot gestrichelt) überdeckt, der durch das Aufkleben der Prismen mit einer Länge von 10 cm und den Prismenabstand $z_{pr} = 82,6$ mm definiert wird. Dies ist notwendig, damit keine Rückstände nach der Reinigung auf der Platte vorhanden bleiben, da das Schmutzdetektionssystem ansonsten selbst nach der Reinigung noch Verunreinigungen erkennt.

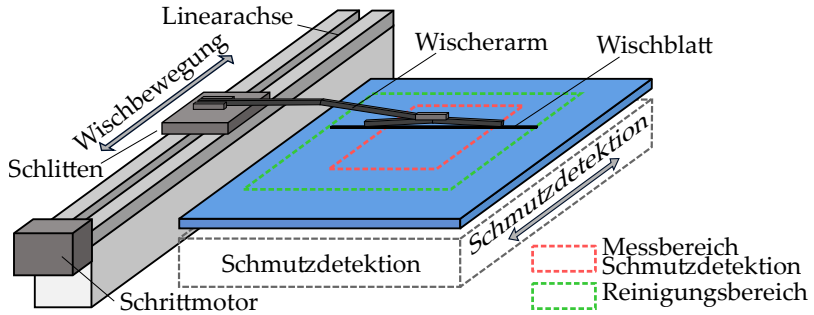


Abbildung 5.22: Gesamtsystem aus linear beweglichem Wischer auf der Oberseite und Schmutzdetektionssystem auf der Unterseite der Platte. Durch den Verfahreweg und die Wischblattlänge wird der Reinigungsbereich (grün) so definiert, dass der Bereich der Schmutzdetektion (rot) vollständig überdeckt wird.

Die beiden Systeme (Reinigungssystem und Schmutzdetektionssystem) werden im gezeigten Aufbau von der gleichen Software gesteuert, können aber unabhängig und ungestört voneinander arbeiten.

Das System zur Schmutzdetektion unterhalb der Platte entspricht der Beschreibung im ersten Abschnitts dieses Kapitels. Um den Verschmutzungsgrad entlang der Platte aufzulösen, wird analog zum gezeigten System in Kapitel 4.3 eine lineare Bewegung benötigt. Da für den Scheibenwischer die Platte in der Position fixiert sein muss, werden im hier gezeigten System die Komponenten (Sendeeinheit, Empfangseinheit) selbst bewegt. Abbildung 5.23 zeigt das Gesamtsystem in der Seitenansicht. Um den durch die Prismen definierten Bereich vollständig messen zu können, werden die Komponenten mit einer Linearachse (6) mit einem Fahrweg von 10,6 cm unterhalb der Platte (1) verfahren. Über die beiden Koppelprismen (2) kann die Strahlung bei jeder Position der Linearachse entlang der beispielhaft gezeigten Linie durch die Platte von der Sendeeinheit (4) zur Empfangseinheit (5) propagieren.

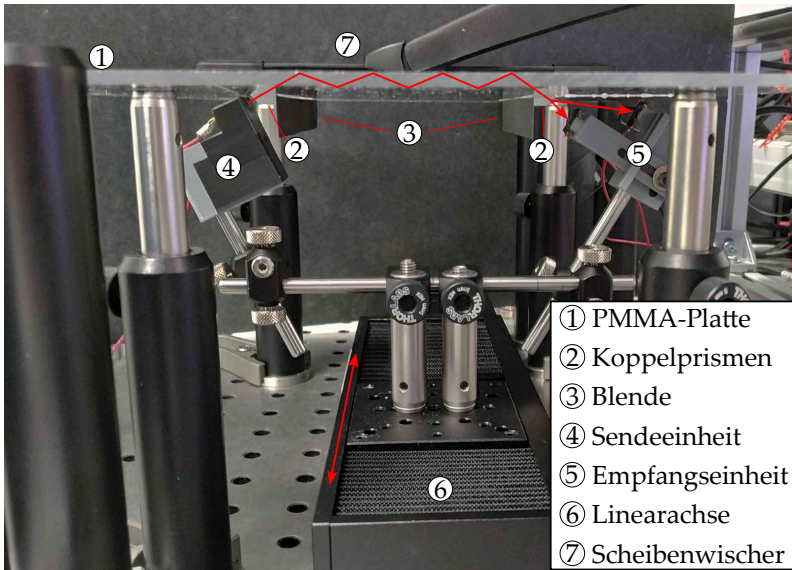


Abbildung 5.23: Kombiniertes System aus Schmutzdetektion (2-6) und Reinigung (7) ober- bzw. unterhalb der PMMA-Platte (1). Beide Systeme können voneinander getrennt linear verfahren werden. Das System zur Schmutzdetektion bestimmt so den Verschmutzungsgrad entlang der Bewegungsrichtung und löst gegebenenfalls die Reinigung aus.

Der Verschmutzungsgrad wird dann entlang der Bewegungsrichtung der Achse aufgelöst. An den Innenseiten der beiden Prismen sind jeweils Blenden (3) entlang der gesamten Prismenlänge aufgeklebt. Die erste Blende verhindert die Propagation von Licht unterhalb der Platte, während die zweite Blende zur Reduzierung von Streustrahlung verwendet wird.

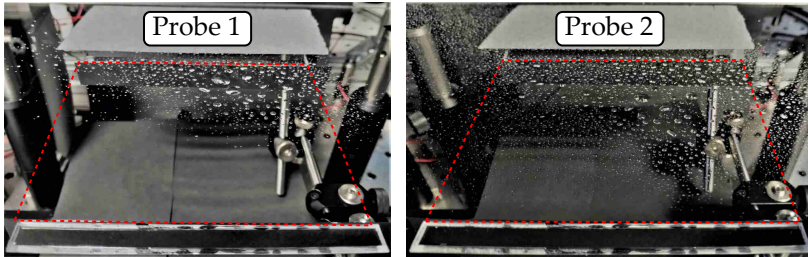
Im folgenden Abschnitt soll das vorgestellte System getestet werden. Dazu wird zunächst die Schmutzdetektion betrachtet, bei der die Unterscheidung von festen und flüssigen Verunreinigungen die zentrale Funktion darstellt. Der integrierte Scheibenwischer wird im Anschluss

daran genutzt, um die aufgetragenen Verunreinigungen zu entfernen, bevor das Schmutzdetektionssystem erneut den Zustand der Plattenoberfläche überprüfen kann.

5.2.3 SCHMUTZDETEKTION UND INTERPRETATION

Bevor die Funktion des Scheibenwischers genutzt wird, soll der Zusammenhang zwischen der Schmutzdetektion und der Reinigungsentscheidung evaluiert werden. Dazu werden zunächst die möglichen Verunreinigungen in Form von Wasser, Staub und Salz auf die Platte aufgetragen und die Messung mit beiden Photodioden durchgeführt. Die dabei auftretenden Fälle möglicher Kombination von festen Verunreinigungen und Wasser werden im Anschluss in verschiedene daraus folgende Reinigungsentscheidungen gegliedert.

Zu Beginn wird die Signalveränderung durch Wassertropfen untersucht, die sicherlich die am häufigsten auftretende Verunreinigung darstellt. Die Evaluierung einzelner Tropfen wie in Abschnitt 4.3.1 wird dabei nicht erneut durchgeführt, stattdessen werden nur Tropfenverteilungen betrachtet, die mit einer Sprühflasche auf die Plattenoberfläche aufgetragen werden. Abbildung 5.24 zeigt die Plattenoberfläche der zwei zu messenden Proben. Der Detektionsbereich ist zur Übersicht rot markiert. Die Propagationsrichtung erfolgt in der gezeigten Darstellung vertikal, die Bewegung der Linearachse horizontal entlang der Prismen. Probe 1 zeigt eine Tropfenverteilung, bei der nur im hinteren Probenbereich Tropfen vorhanden sind. Die Anzahl und Größe der Wassertropfen und somit auch der Verschmutzungsgrad nehmen dabei von links nach rechts hin zu. Die zweite Probe hingegen zeigt eine Verteilung sehr vieler Tropfen über die gesamte Oberfläche hinweg mit einigen größeren Tropfen im rechten Bereich.



 Detektionsbereich

Abbildung 5.24: Proben mit Zufallsverteilungen von Wasserproben P1 und P2. Der durch die Prismenlänge und die Bewegung der Linearachse definierte Detektionsbereich ist rot markiert.

Vor Auftragen der Verunreinigung wird eine Messung mit beiden Photodioden bei Bewegung der Platte durchgeführt, die zur Normierung der Messdaten verwendet wird. Damit werden Einflüsse von Hintergrundlicht und Ungenauigkeiten der Prismen minimiert. Die Messung mit vorhandener Verunreinigung erfolgt unmittelbar nach dem Aufsprühen, damit auch kleine Tropfen noch auf der Platte vorhanden sind. Alle Messungen erfolgen mit beiden Photodioden (PD1 und PD2) simultan. Im Anschluss werden die Messwerte den jeweiligen Achsenpositionen zugeordnet. Die bereits mit der Referenzmessung normierten Messergebnisse sind in Abbildung 5.25 für beide Proben (P1 und P2) gezeigt. Die oberen Photodioden (PD2, blau und rot) beschreiben die Tropfenverteilung auf der Platte. Während bei der ersten Probe die Intensität von links nach rechts weiter abnimmt, ist der Verlust bei der stärker benetzten Probe P2 nahezu gleich verteilt über die gesamte Verschiebung. Selbst bei hoher Benetzung fällt die Intensität nicht unter 20 % der Ausgangsintensität, sodass als untere Grenze $I_{\min} \approx 0,2$ angenommen werden kann. Die Entstehung des Offsets als untere Grenze wurde bereits in Abschnitt 4.3.1 ausführlich untersucht und folgt aus den Winkelanteilen, die an Wasser totalreflektieren.

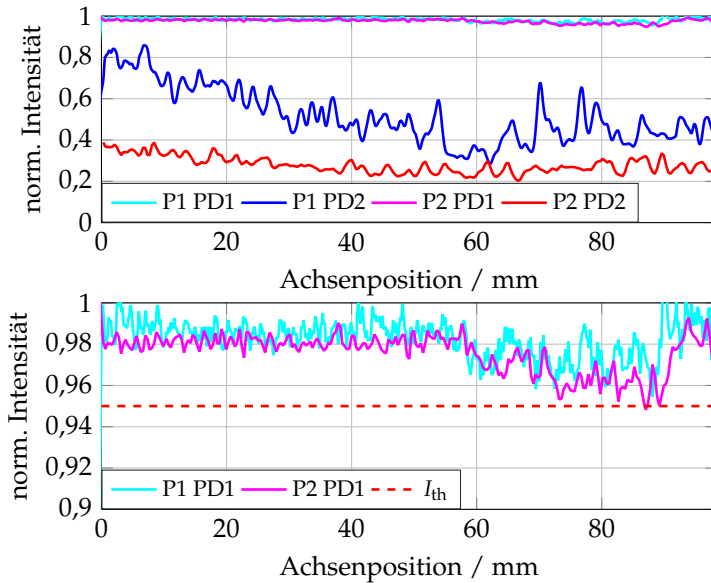


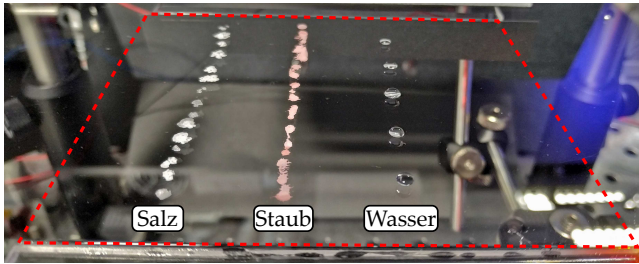
Abbildung 5.25: Messung der beiden Tropfenverteilungen der Proben P1 und P2 mit beiden Photodioden PD1 und PD2. Die untere Photodiode (PD2) beschreibt den Verschmutzungsgrad, der für anhaftende Wassertropfen bis zu einem Minimalwert $I_{\min} \approx 0,2$ fallen kann. Die obere Photodiode (PD1) weist nur einen geringen Signalverlust bis 5% auf, der durch Plattenungenauigkeiten und Streustrahlung entstehen kann.

Auch wenn die Messung dieses Winkelbereichs im hier vorgestellten System prinzipiell für die obere Photodiode vorgesehen ist, fällt aufgrund der Überlappung ein Teil auch auf die untere Photodiode (siehe Abbildung 5.20). Der Offset gilt folglich nur für anhaftende Wassertropfen. Feste Verunreinigungen können zu einem vollständigen Signalverlust führen, da alle Winkelanteile vom Verlust betroffen sind. Durch die Messung mit der unteren Photodiode PD2 kann wie bereits dargestellt der Verschmutzungsgrad interpretiert werden. Die Messung der oberen Photodiode PD1 ist vergrößert im Bereich bis zu

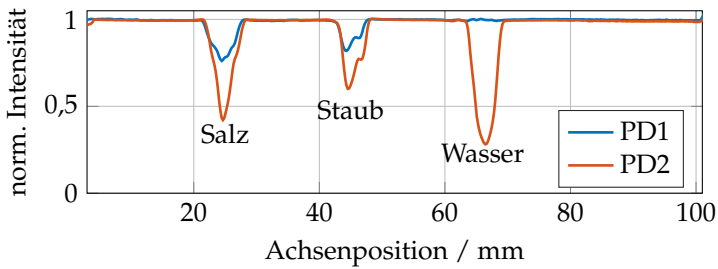
10 % Verlust im unteren Diagramm gezeigt. Der Signalverlust liegt für beide Proben bei ca. 2 % und steigt im Bereich der größten Benetzung auf 5 % an. Generell werden durch die Auslegung des Systems keine Verlustanteile bei einer Benetzung mit Wasser erwartet. Der dennoch auftretende Verlust kann durch mehrere Sachverhalte entstehen. Bereits beschrieben wurde die ungenaue Fertigung der Prismen, die auf die Platten aufgeklebt wurden. Durch Krümmungen der eigentlich glatten Auskoppelfläche können Strahlungsanteile mit $\alpha < \alpha_{c,H_2O}$ auch zur oberen Photodiode hin gebrochen werden, die durch anhaftende Tropfen aus der Platte auskoppeln und somit den gemessenen Verlust bewirken. Außerdem trifft auch, insbesondere durch die horizontale Divergenz in der Platte, ein bestimmter Anteil an Streulicht auf die Photodioden, der durch die Referenzmessung teilweise eliminiert werden kann. Befinden sich nun Tropfen auf der Platte, so koppeln lediglich die Strahlungsanteile mit $\alpha < \alpha_{c,H_2O}$ aus der Platte aus. Dadurch wird die gesamte Intensität am Plattenende reduziert, von der ein Anteil als Streulicht auf die Photodioden trifft. Das Streulicht wird damit ebenfalls reduziert, sodass die gemessene Intensität der oberen Photodiode sinkt. Zur Unterscheidung der Verunreinigungen ist die Unabhängigkeit der oberen Photodiode bezüglich anhaftender Wassertropfen zwingend notwendig. Da selbst bei sehr starker Benetzung der Einfluss bei maximal 5 % liegt, bietet sich die Einführung eines Schwellwertes bei $I_{th} = 0,95$ an. Der Rückschluss, dass es sich bei der Verunreinigung um Wasser handelt, folgt aus dem Vergleich der Messungen beider Photodioden. Misst die erste Photodiode nur Werte oberhalb des Schwellwertes, die zweite Werte deutlich unterhalb des Schwellwertes, so kann auf das Vorhandensein von Wasser zurückgeschlossen werden. Haften feste Partikel auf der Platte, so wird der Verlust gleichermaßen für beide Photodioden erwartet.

Zur Evaluierung des tatsächlichen Verhaltens unterschiedlicher Verunreinigungen werden simultan Wasser, Staub und Salz auf der Platte

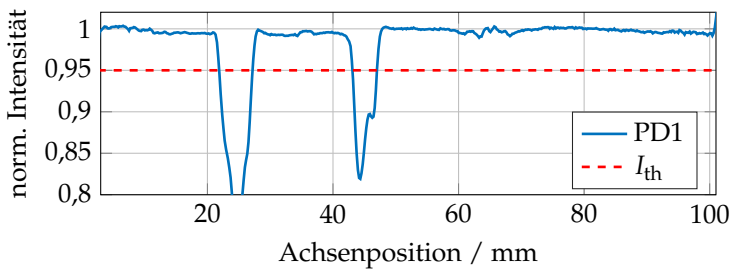
platziert. Sowohl Staub als auch Salz werden in einer flüssigen Lösung tropfenweise aufgetragen. Die Messung erfolgt sobald nur die festen Anteile zurückbleiben. Die Verunreinigungen werden entlang der Propagationsrichtung horizontal versetzt aufgetragen. Abbildung 5.26a zeigt die Verunreinigungen auf der Platte im rot markierten Messbereich zwischen den Prismen. Die zugehörigen, mit einer Referenz normierten Messungen sind in Abbildung 5.26b für beide Photodioden dargestellt. Jeweils an den Positionen der Verunreinigungen (horizontal in Abbildung 5.26a) sinkt das Signal in Form von Einbrüchen mit der Breite der gesamten Verunreinigung entlang der Propagationsrichtung. Die obere Photodiode (PD1) misst nur bei Salz und Staub einen Verlust, während das Signal der unteren Photodiode (PD2) an jeder dieser Positionen abnimmt. Der durch Wassertropfen deutlich höhere Verlustanteil wurde bereits in Kapitel 4.3.1 durch die Anhaftbedingungen von Tropfen im Vergleich zu kleinen Staub- oder Salzpartikeln begründet. Zur genaueren Unterscheidung ist das Signal der oberen Photodiode in Abbildung 5.26c mit dem definierten Schwellwert I_{th} gezeigt. Dabei wird der Schwellwert nur bei anhaftenden Salz und Staubpartikeln unterschritten, sodass die Trennung zu Wasser durchgeführt werden kann. An der Position der anhaftenden Wassertropfen (ca. 65 mm) sind nur kleine Schwankungen bis maximal 2% zu erkennen. Über die gesamte Bewegung der Achse hinweg schwankt die normierte Intensität auch an sauberen Positionen um ca. $\pm 1\%$. Diese Schwankungen entstehen durch die große Zeitspanne zwischen Referenzmessung und Messung der Probe, in der der Trockenprozess abgewartet wird. Dabei können Temperaturschwankungen im Raum leichte Deformationen der Platte erzeugen und damit das zugrundeliegende Referenzsignal verändern. Zusätzlich variiert die LED-Leistung auch nach hinreichender Einschwingzeit noch geringfügig. Durch Optimierung der Systemkomponenten können diese Einflüsse weiter unterdrückt werden. Die in der Anwendung im Automobil dominie-



(a)



(b)



(c)

Abbildung 5.26: Aufgetragene Verunreinigungen (Salz, Staub und Wasser) entlang der Propagationsrichtung im rot markierten Messbereich (a). Die erste Photodiode (PD1) zeigt einen Signalverlust bei Vorhandensein von Salz und Staub, die zweite (PD2) bei allen möglichen Verunreinigungen (b). Der Schwellwert I_{th} wird nur von Salz und Staub unterschritten (c).

rende Herausforderung ist dann die Unterdrückung von Hintergrundstrahlung, die den Grundpegel des Signals verändert und durch eine Differenzmessung ausgeglichen werden kann (vgl. Abbildung 4.3).

Die aufgetragenen Staub- und Salzpartikel in Abbildung 5.26a eignen sich gut für die Trennung der unterschiedlichen Verunreinigungen in einer einzelnen Messung, stellen aber keine realistischen Schmutzverteilungen dar. Dazu werden im nächsten Schritt, ähnlich zu den erstellten Proben in Abschnitt 3.2.1, schichtweise Salz- und Staublösungen auf der Plattenoberfläche im Messbereich aufgetragen. Nach dem Trocknen jeder einzelnen Schicht wird die Messung mit beiden Photodioden durchgeführt, bevor die nächste Schicht aufgesprüht

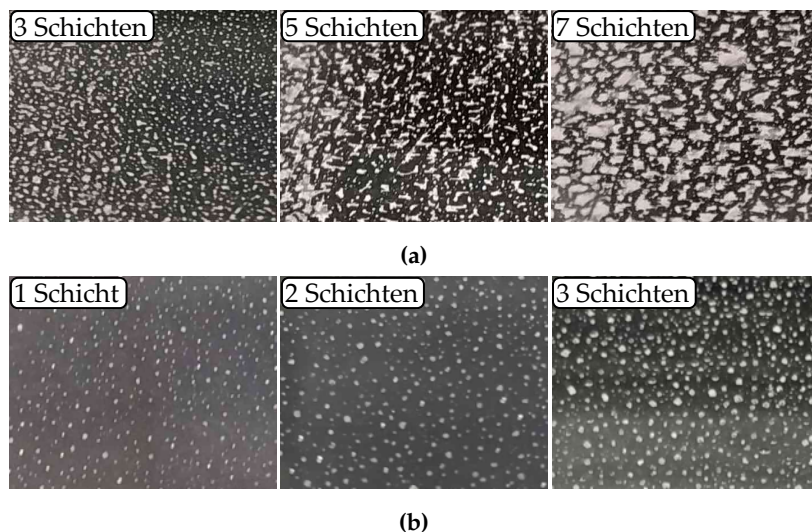


Abbildung 5.27: Schichtweise erstellte Proben im Detektionsbereich des Messaufbaus mit drei, fünf und sieben Schichten Staub in (a) und einer, zwei und drei Schichten in (b), hier dargestellt in einem ca. 1,5 cm x 1,0 cm großen Ausschnitt. Durch Folgeschichten wachsen die Akkumulationen von Partikeln weiter an.

wird. Vor Auftragen der ersten Schicht wird eine Referenz zur Normierung gemessen. Die getrockneten Proben sind in Abbildung 5.27 für Staub in (a) und Salz in (b) in einem Ausschnitt von ca. 1,5 cm x 1,0 cm gezeigt. Zur besseren Sichtbarkeit wurde ein schwarzer Hintergrund hinter die transparenten Proben platziert. Durch die Aufbringung in Tropfenform akkumulieren die Partikel zu größeren Ansammlungen. Bei Auftragen weiterer Schichten bewegen sich die Tropfen zu den Ansammlungen, sodass diese weiter wachsen.

Abbildung 5.28 zeigt die normierte Intensität zu den Messungen der gezeigten Proben mit drei, fünf und sieben Schichten Staub in (a,b) und einer, zwei und drei Schichten Salz in (b,c). Die erste Messung zeigt jeweils die zweite Photodiode und beschreibt den Verschmutzungsgrad (a,c), die zweite Messung zeigt die erste Photodiode und den definierten Schwellwert I_{th} (b,d). Sowohl bei Staub als auch bei Salz steigt der Verschmutzungsgrad mit höherer Anzahl an aufgetragenen Schichten bis zu einem Verlust von ca. 50 % an. Während die Salzsichten eine homogene Verteilung aufweisen, zeigen die Staubmessungen eine geringere Intensität im Bereich von 20 mm bis 50 mm. In diesem Bereich ist die Staubverteilung flächendeckender als auf dem Rest der Platte. Die Bildausschnitte der Proben in Abbildung 5.27a beschreiben den Übergangsbereich (ca. 40 mm bis 55 mm), sodass im linken Bereich der Bilder jeweils die Ansammlung größerer, fleckiger Bereiche erkennbar ist. Die unterschiedliche Anlagerung der Partikel beruht möglicherweise auf den variierenden Anhaftbedingungen auf der Platte, die durch den Reinigungsprozess zwischen einzelnen Messungen entstehen und wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Anders als bei der Verunreinigung durch Wasser ist der relative Intensitätsverlauf beider Photodioden nahezu gleich. Der wesentliche Unterschied liegt in der Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen, die für die zweite Photodiode aufgrund der durch die geringeren Propagationswinkel bedingten, höheren Anzahl an Totalreflexionen wesentlich größer ist.

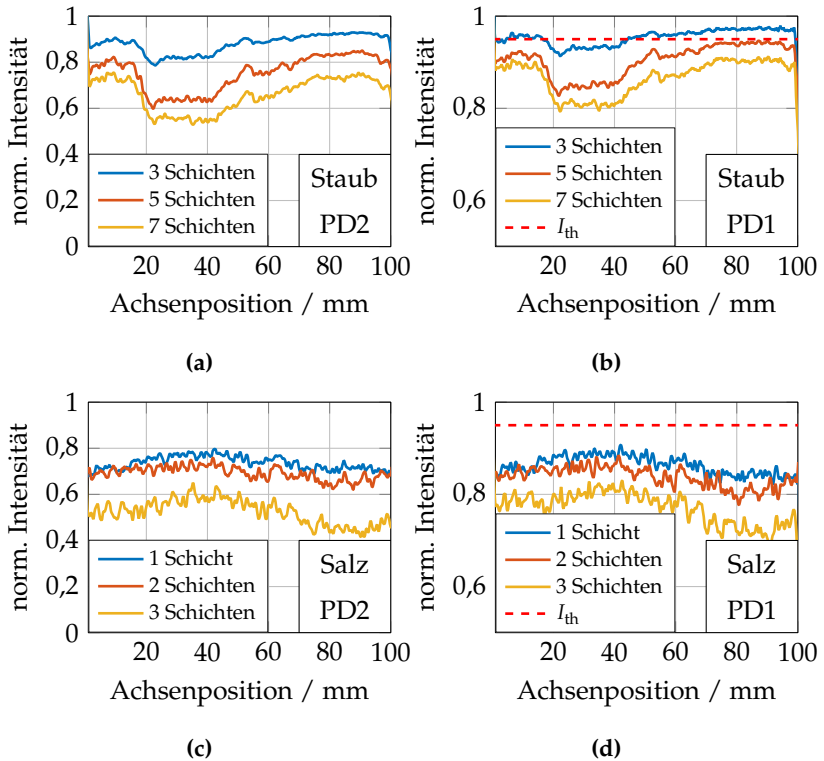


Abbildung 5.28: Normierte Intensität für die Proben in Abbildung 5.27 aus Staub (a,b) und Salz (c,d), aufgeteilt nach den beiden Photodioden. Im Gegensatz zur Messung mit Wasser ist der relative Verlauf beider Photodioden gleich, die Absolutwerte hingegen nicht. Mit steigender Verschmutzung sinkt die Intensität weiter ab. Der festgelegte Schwellwert I_{th} für PD1 wird bei geringem Verschmutzungsgrad (drei Schichten Staub) nicht unterschritten.

Durch die Festlegung des Schwellwertes bei $I_{th} = 0,95$ wird erst ab einem bestimmten Verschmutzungsgrad die Verunreinigung als fest erkannt. So wird beispielsweise für die erste Messungen mit drei Schichten Staub nur im stärker verschmutzten Bereich der Schwellwert

von PD1 unterschritten. Alle Werte außerhalb werden nicht klassifiziert, stellen allerdings nur eine geringe Einschränkung dar, da der Verschmutzungsgrad in der Größenordnung von 10 % liegt. Um auch diese leicht verschmutzten Bereiche klassifizieren zu können, müsste der Schwellwert weiter erhöht werden. Durch die Einschränkungen aufgrund von Ungenauigkeiten der Systemkomponenten wird der Schwellwert hier weiterhin auf $I_{th} = 0,95$ festgelegt. Alternativ zur Erhöhung des Schwellwertes kann auch das Signal der zweiten Photodiode zur Entscheidungsfindung hinzugezogen werden. Liegt das Signal der ersten Photodiode oberhalb, aber nahe des Schwellwertes, so wird bei anhaftenden Wassertropfen ein hoher Signalverlust der zweiten Photodiode erwartet, während bei anhaftenden festen Verunreinigungen dort auch nur ein geringer Verlust resultiert.

Die Isolierung des Anteils fester Verunreinigungen soll im folgenden für die bisher gezeigten Proben durchgeführt werden. In Gleichung (4.5) wurde bereits für die Messung mit einer einzelnen Photodiode der Verschmutzungsgrad V durch den gemessenen Verlust definiert. Mit der Umsetzung der aus zwei Photodioden bestehenden Schmutzdetektion wird für die Definition des Verschmutzungsgrades die zweite Photodiode verwendet

$$V_{ges} = 1 - I_{PD2}. \quad (5.17)$$

Der Verschmutzungsgrad V_{ges} beschreibt die gesamte Verschmutzung auf der Scheibe, die sich aus festen und flüssigen Anlagerungen zusammensetzen kann. Um aus dem Verschmutzungsgrad den durch feste Verunreinigungen bestimmten Anteil zu isolieren, wird ein Entscheidungswert E aus dem Schwellwert I_{th} und der normierten Intensität der ersten Photodiode definiert gemäß

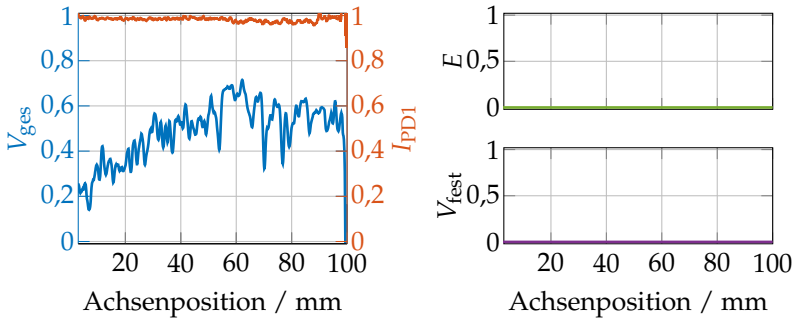
$$E = \begin{cases} 0, & I_{PD1} > I_{th} \\ 1, & I_{PD1} \leq I_{th}. \end{cases} \quad (5.18)$$

Das Produkt aus dem Entscheidungswert und dem gesamten Verschmutzungsgrad V_{ges} liefert den Verschmutzungsgrad durch feste Anlagerungen

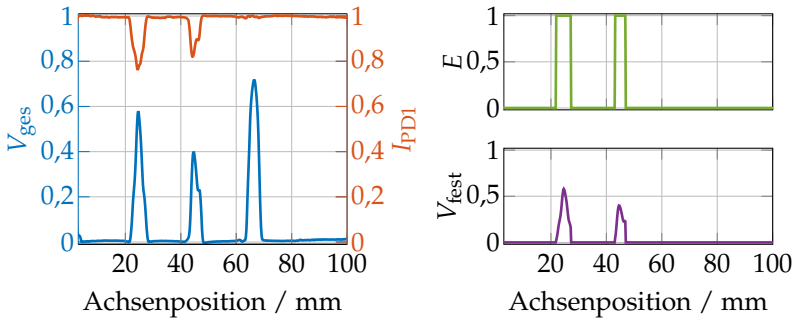
$$V_{\text{fest}} = E \cdot V_{\text{ges}}. \quad (5.19)$$

Generell kann V_{fest} auch direkt aus der Messung der ersten Photodiode berechnet werden. Die Definition hier erfolgt dennoch über PD2, sodass PD1 nur für die Unterscheidung verwendet wird. Hintergrund ist die homogenere Lichtverteilung in der Platte, die von PD2 aufgenommen wird. Durch die Homogenität aufgrund der hohen Anzahl an Totalreflexionen ist die Positionsabhängigkeit der Verschmutzung entlang der Propagationsrichtung geringer, sodass der erhaltene Wert eine zuverlässigere Beschreibung liefert.

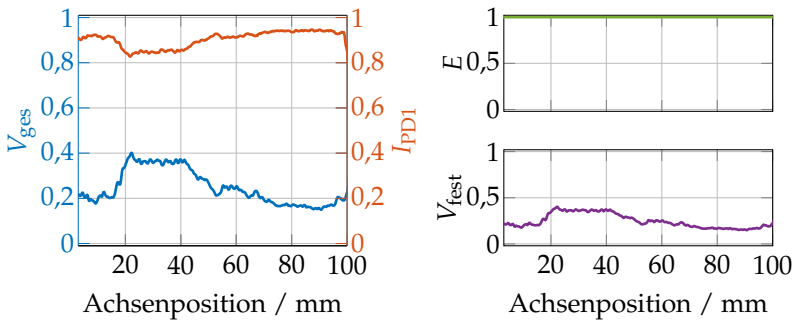
Abbildung 5.29 zeigt den gesamten Verschmutzungsgrad V_{ges} , den aus I_{PD1} folgenden Entscheidungswert E sowie den isolierten Anteil an festen Verunreinigungen V_{fest} , aufgeteilt in die zuvor gezeigten Möglichkeiten an anhaftenden Verunreinigungen. Die Auswertung wird beispielhaft dargestellt mit Probe 1 aus Wasser (Abbildung 5.24), der entlang der Achsenbewegung verteilten Proben von Staub, Salz und Wasser (5.26a) sowie der Staubverteilung bestehend aus fünf Schichten (5.27a). Bei anhaftenden Wassertropfen im Regenfall (a) erreicht der Verschmutzungsgrad V_{ges} hohe Werte bis maximal 0,7 im Bereich mit der stärksten Benetzung (blau). Da die Intensität I_{PD1} (rot) nicht unter den Schwellwert fällt, ist der Entscheidungswert überall Null und es werden keine festen Verunreinigungen erkannt. In der Verteilung verschiedener Verunreinigungen auf unterschiedlichen Plattenpositionen (b) zeigt der Verschmutzungsgrad für alle drei gezeigten Verunreinigungen Werte im Bereich 0,4 - 0,7. Die Intensität I_{PD1} fällt nur für die ersten beiden Ausschläge (Staub und Salz) unter den Schwellwert, sodass der Entscheidungswert E nur an diesen Stellen auf 1 gesetzt wird.



(a) Wasser (Abbildung 5.24, links)



(b) Wasser, Staub, Salz (Abbildung 5.26a)



(c) Staub (Abbildung 5.27a, Mitte)

Abbildung 5.29: Gesamter Verschmutzungsgrad V_{ges} , Entscheidungswert E und Anteil fester Verschmutzung V_{fest} für die unterschiedlichen Probenarten: (a) Wasser, (b) Salz, Staub und Wasser, (c) Staub.

Der feste Verschmutzungsgrad V_{fest} weist dann nur noch die beiden isolierten Ausschläge auf, die durch die anhaftenden Staub- und Salzpartikel entstehen. Im dritten Fall von rein fester Verunreinigung ist der Verschmutzungsgrad V_{ges} über die Achsenbewegung unterschiedlich ausgeprägt. Der Schwellwert wird von I_{PD1} dauerhaft unterschritten, sodass die beiden Verschmutzungsgrade gleichzusetzen sind ($V_{\text{ges}} = V_{\text{fest}}$).

Die Verschmutzungsgrade beschreiben den Zustand der Scheibe entlang der Bewegungsrichtung des Systems. Im nächsten Schritt soll mit den vom Schmutzdetektionssystem bereitgestellten Daten die Reinigungsentscheidung getroffen werden, die mit dem vorgestellten Wischersystem und einer manuellen Auftragung von Reinigungsflüssigkeit getestet wird.

5.2.4 REINIGUNGSENTSCHEIDUNG

Zu Beginn des Kapitels wurden bereits die Reinigungsmodi definiert, die nun mit Hilfe des Schmutzdetektionssystems automatisch ausgewählt werden können. Die Reinigungsmodi gliedern sich nach dem definierten Reinigungssystem bestehend aus Scheibenwischer und der Auftragung zusätzlicher Reinigungsflüssigkeit durch Spritzdüsen. Zur Entscheidungsfindung werden zwei Fragestellungen nacheinander beantwortet:

- Ist eine Reinigung notwendig?
- Wird zusätzliches Spritzwasser benötigt?

Letztere Frage ist zur Vermeidung von Wischvorgängen ohne vorhandene Flüssigkeit auf der Scheibe relevant, um der Entstehung von Kratzern auf der Schutzscheibe durch das Wischen über feste Partikel vorzubeugen. Die endgültige Entscheidung und der resultierende

Reinigungsvorgang werden anhand zweier Beispielsituationen beschrieben, die gleichzeitig auch die relevantesten und am häufigsten auftretenden Situationen darstellen. Die erste Situation zeigt das Anhaften von Wassertropfen, die hauptsächlich bei Regen auftreten. Da in der Regel dann keine Reinigungsflüssigkeit notwendig ist, sollen nur die Scheibenwischer ausgelöst werden. Der zweite Fall beschreibt die Verteilung von festen Staubpartikeln, die beispielsweise bei längerem Stillstand des Fahrzeugs entstehen kann.

Die genannten Fälle sind in Abbildung 5.30 für beide Proben (Wasser und Staub) gezeigt. Dabei werden jeweils der berechnete gesamte Verschmutzungsgrad V_{ges} sowie der Verschmutzungsgrad für feste Verunreinigungen V_{fest} für die Messung vor der Reinigung (links) und nach der Reinigung (rechts) gezeigt. Alle weiteren Datensätze sowie die Proben selbst werden nicht gezeigt und decken sich mit den vorherigen Ergebnissen. Die erste Frage nach der Notwendigkeit der Reinigung wird mit V_{ges} bestimmt. In (a, links) ist ein hoher Verschmutzungsgrad bis $V_{\text{ges}} \approx 0,7$ (blau) über den gesamten Messbereich erkennbar. Folglich wird eine positive Reinigungsentscheidung getroffen, die vorerst nur durch den Scheibenwischer definiert ist. Bevor dieser ausgelöst wird, wird der feste Verschmutzungsgrad V_{fest} analysiert. Da dieser keine Verschmutzung aufweist, wird kein zusätzliches Spritzwasser benötigt und der Scheibenwischer wischt den in Abbildung 5.22 definierten Reinigungsbereich mit einer einzelnen Wischbewegung (hin und zurück). Nach dem Wischvorgang wird eine Kontrollmessung mit dem Schmutzdetektionssystem durchgeführt, bei der nur ein unwesentlicher Rückstand an Verschmutzung gemessen wird (a, rechts).

Liegt eine Verschmutzung in Form einer Staubschicht auf der Platte vor (b), so wird durch V_{ges} wie auch im Falle von Wassertropfen ein Verschmutzungsgrad über die gesamte Plattenbewegung ermittelt

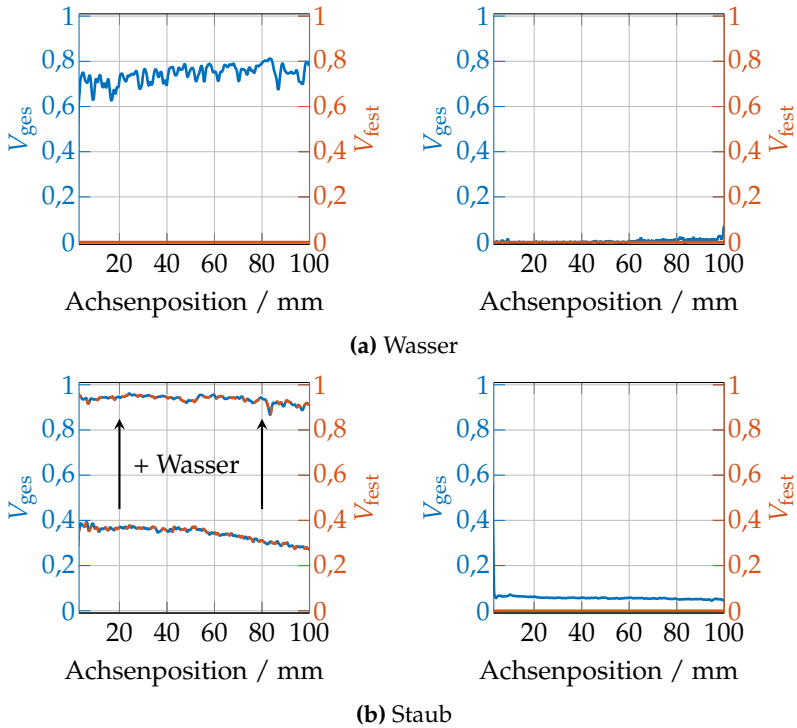


Abbildung 5.30: Verschmutzungsgrade V_{ges} und V_{fest} bei anhaftenden Wassertropfen in (a) und einer Staubschicht in (b) mit jeweiliger Messung vor der Reinigung (links) und nach der Reinigung (rechts). Während in (a) die Nutzung der Scheibenwischer ausreicht, wird in (b) vorab die Auftragung einer Reinigungsflüssigkeit benötigt.

(links, untere Kurve). Die Entscheidung, dass die Scheibenwischer benötigt werden, wird dann analog getroffen. Ein anderes Verhalten ist dann im festen Verschmutzungsgrad V_{fest} erkennbar, der mit V_{ges} übereinstimmt. Die vorliegende, als fest erkannte Verunreinigung kann folglich nicht ohne eine Reinigungsflüssigkeit entfernt werden. Vor der Reinigung wird somit eine Reinigungsflüssigkeit benötigt, die

im beispielhaften Laborsystem manuell aufgetragen wird. Vor dem Auslösen der Scheibenwischer wird eine zusätzliche Messung mit dem Schmutzdetektionssystem durchgeführt, um die Ergebnisse bei gleichzeitigem Vorhandensein von Staub und Wasser zu untersuchen (b, links, obere Kurven). Durch das zusätzliche Wasser steigt V_{ges} stark an und erreicht Werte $> 0,9$, die bei Wasser allein aufgrund der beschriebenen Untergrenze nicht auftreten können. Die Verunreinigung wird dennoch als fest erkannt, auch wenn eigentlich eine Mischung aus Feststoffen und Flüssigkeiten vorliegt. Im gezeigten Fall ist die Situation bekannt, da die Reinigungsflüssigkeit aktiv aufgebracht wurde. Der Mischfall von fest und flüssig kann aber auch auftreten, wenn bei vorhandenen festen Verunreinigungen eine Regensituation zusätzlich Wasser auf der Scheibe hinterlässt. Das gezeigte System würde dann dennoch zusätzlich Reinigungsflüssigkeit vor dem Auslösen der Wischer auftragen. Da die vorhandene Wassermenge nicht genau definiert werden kann, wird damit sichergestellt, dass der Reinigungsvorgang in jedem Fall erfolgreich ist. Der in der gezeigten Messung nach der Auftragung durchgeführte Reinigungsvorgang entfernt nahezu alle Verunreinigungen (b, rechts). Die geringe Restverschmutzung entsteht durch kleine Tropfen, die bei dem einzelnen Wischvorgang als Rückstand auf der Platte übrig geblieben sind.

Mit dem vorgestellten System zur Detektion und Charakterisierung von Verunreinigungen konnte in diesem Kapitel gezeigt werden, dass die vollautomatisierte Ansteuerung eines Wischer-Spritzdüsen-Systems durch Erweiterung des klassischen Regensors möglich ist. Neben der Unterscheidung der Art der Verunreinigung wird auch der Verschmutzungsgrad bestimmt, der durch die Bewegung der Komponenten zusätzlich eine horizontale Auflösung liefert. Im folgenden Abschnitt werden die grundlegenden Schritte noch einmal zusammengefasst, die zur Integration in einen LiDAR-Sensor durchgeführt werden müssen. Des weiteren werden bisher nicht be-

trachtete Aspekte wie die Dynamik des Messsignals in veränderlichen Situationen beschrieben, die im Laborsystem aufgrund der künstlich erzeugten Proben nicht auftreten.

5.2.5 DISKUSSION

Für die Realisierung hochautomatisierter Fahrzeuge scheint die Integration einer Sensorreinigung notwendig, um die Sensorfunktionalität auch in schwierigen Bedingungen zu gewährleisten. Da sich im Automobil die Kombination von Scheibenwischern und Spritzdüsen an Windschutzscheiben etabliert hat, wurde der gleiche Lösungsansatz für LiDAR-Sensoren in dieser Arbeit untersucht. Der Fokus wurde dabei auf die Detektion anhaftender Verunreinigungen gelegt, um den Reinigungsprozess steuern zu können. Im Vordergrund steht dabei die vollständige Automatisierung der Scheibenwischer und gleichzeitig auch der Spritzdüsen, die in konventionellen Systemen vom Fahrer ausgelöst werden. Der vollständige Prozess der Überwachung der Sensorschutzscheibe mit anschließender Reinigung wird in Abbildung 5.31 mit allen wichtigen Entscheidungsparametern zusammengefasst. Der erste Block (blau hinterlegt) beschreibt den hardwareseitigen Ansatz der Schmutzdetektion, in der die Messungen der beiden definierten Photodioden die notwendige Information über den Verschmutzungszustand generieren. Ein weiteres Kernelement der Schmutzdetektion ist die Bewegung der Systemkomponenten und somit des gesamten, in der Schutzscheibe propagierenden Lichtpfades, der den momentanen Detektionsbereich entlang der Ausbreitungsrichtung definiert. Insbesondere bei der Integration der Schmutzdetektion in rotierende LiDAR-Scanner können die Komponenten an die ohnehin vorhandene Rotationsachse gekoppelt werden und die Sensoroberfläche winkelaufgelöst überwachen. Im nächsten Schritt

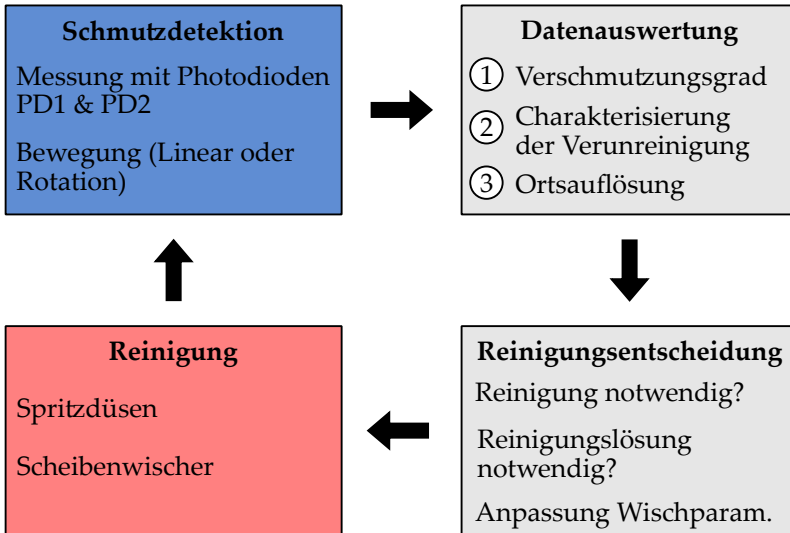


Abbildung 5.31: Schmutzdetektions- und Reinigungszyklus beginnend bei der Datenerfassung entlang der Sensorbewegung mittels beider Photodioden. Durch die Auswertung der Daten werden die Verunreinigungen erkannt und charakterisiert, sodass die Reinigungsentscheidung getroffen und die notwendigen Reinigungsmaßnahmen erfolgen können.

werden die Messdaten ausgewertet. Dabei wird zuerst der gesamte Verschmutzungsgrad bestimmt, der jegliche Verunreinigungen erfasst und im Anschluss der Anteil fester Verunreinigungen daraus separiert. Die beiden Verschmutzungsgrade sind den Positionen bzw. Winkeln entlang der Oberfläche zugeordnet und werden für die im nächsten Schritt folgende Reinigungsentscheidung verwendet. Der gesamte Verschmutzungsgrad bestimmt, ob eine Reinigung notwendig ist, die durch die Nutzung eines Scheibenwischers definiert ist. Ist gleichzeitig der Anteil fester Verunreinigungen überwiegend, so wird zusätzliches Spritzwasser vor der Durchführung des Wischvorgangs benötigt. Ein weiterer Punkt in der Reinigungsentscheidung ist die Anpassung der

Wischparameter, wie zum Beispiel die Wischgeschwindigkeit bei kontinuierlichem Wischen. Die Diskussion dieser Parameter wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt, ist im Stand der Technik aber bereits hinreichend bekannt durch die bereits in vielen Fahrzeugen verbauten Regensensoren. Der letzte Block (rot hinterlegt) zeigt die zur Reinigung verwendete Hardware aus Spritzdüsen und Scheibenwischern, die letztendlich die Verunreinigungen auf der Schutzscheibe entfernt. Durch die Sensorrotation wiederholt sich der gezeigte Prozess kontinuierlich, sodass zu jedem Zeitpunkt der Zustand überwacht und gegebenenfalls eine Reinigung angestoßen werden kann.

Der Fokus in dieser Arbeit wurde auf die Umsetzbarkeit des generellen Konzepts gelegt. Die Datenauswertung und insbesondere die Reinigungsentscheidung behandeln noch nicht die Frage, ab welchem Verschmutzungsgrad eine Reinigung notwendig ist. Der evaluierte Zusammenhang zwischen Transmission und der Degradation der Sensorreichweite in Kapitel 3 stellt eine Möglichkeit dar, die zur Reinigungsentscheidung herangezogen werden kann. Dazu wird die Relation zwischen Verschmutzungsgrad und Transmission benötigt. Da die Verunreinigungen nur in zwei Kategorien eingeteilt werden und sich die Reflexionsbedingungen für verschiedene Materialien unterscheiden, ist die Herleitung des Zusammenhangs für feste Materialien als Oberbegriff nicht möglich. Es empfiehlt sich daher, einen Schwellwert für die Auslösung der Scheibenwischer und einen weiteren für die Auslösung der Spritzdüsen zu definieren, der auf Erfahrungswerten durch das Sammeln von Verschmutzungsproben im Straßenverkehr mit darauffolgender Transmissionsmessung beruht.

Durch die Sensorreinigung und allgemeinen Verschleiß degradiert die Transmission der Schutzscheibe durch Kratzerbildung kontinuierlich. Bezüglich der hier vorgestellten Einordnung der Verunreinigungen wirken sich Kratzer (und auch Steinschläge) wie feste Verunreinigungen

gen aus, die für alle Winkelbereiche einen Signalverlust erzeugen. Je nach Stärke und Anzahl der Kratzer kann eine einzelne Messung des Schmutzdetektionssystems die Entscheidung treffen, dass ein vollständiger Reinigungsprozess mit Wischer und Reinigungsflüssigkeit notwendig ist. Die Erkennung der Kratzer muss deshalb wie auch die Einstellung der Wischgeschwindigkeit durch den Vergleich vieler aufeinanderfolgender Messungen getroffen werden. Wird trotz Reinigung eine Degradation dauerhaft nicht entfernt, so kann das Referenzlevel für die Normierung angepasst werden, um weiterhin nur die Erkennung von Verunreinigungen zu ermöglichen. Je nach Intensität der Kratzer oder eines Steinschlags kann ein hoher Signalverlust aber auch genutzt werden, um eine Überprüfung der Sensorschutzscheibe anzufordern, da auch Kratzer die Sensorperformance reduzieren.

Die Nutzung der Ortsauflösung des Verschmutzungsgrades soll abschließend anhand der gezeigten Probe in Abbildung 5.26a verdeutlicht werden. Je nach Auftreten der Verunreinigungen können neben den häufigen Verteilungen von Wassertropfen bei Regen oder anlagernder Staubschichten auch nur einzelne Bereiche der Schutzscheibe betroffen sein. Im gezeigten Beispiel treten entlang der Achsenbewegung drei, durch verschiedene Materialien verunreinigte Bereiche auf. Die Position der Anlagerungen ist nur entlang der Achsenbewegung bekannt, entlang der Propagationsrichtung hingegen unbestimmt. Bei Übertragung des Verschmutzungsgrades auf die gesamte Plattenoberfläche wird der Verlust deshalb auf jeder Position entlang der Ausbreitungsrichtung als gleich angenommen (Abbildung 5.32a). In einem rotierenden LiDAR-Scanner wird die Bewegung der Achse durch die Rotation ersetzt. Die Propagation erfolgt dann vertikal von oben nach unten (oder umgekehrt) in der zylindrischen Schutzscheibe. Bei Betrachtung des Field of Views in der Draufsicht (Abbildung 5.32b) können die verschmutzten und sauberen Bereiche abhängig vom Rotationswinkel bestimmt werden. In diesen Bereichen ist die Sensorreich-

weite beschränkt, sodass möglicherweise Objekte übersehen werden können. Das Hinzuziehen eines Datensatzes durch redundante Sensorik ist dann sinnvoll, um die eingeschränkten Bereiche unabhängig zu überprüfen.

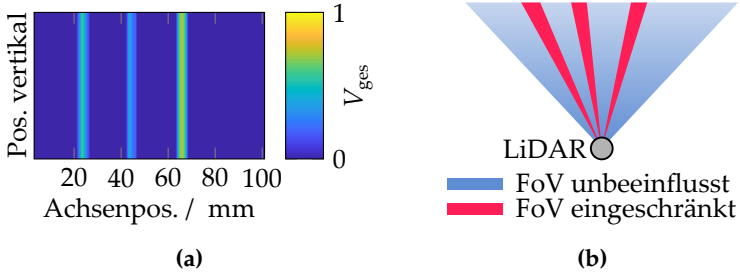


Abbildung 5.32: Übertragung des eindimensional orts aufgelösten Verschmutzungsgrades auf eine zweidimensionale Platte zur Identifizierung verunreinigter Bereiche (a). Bei Betrachtung eines rotierenden LiDAR-Scanners mit zylindrischer Schutzscheibe werden Winkelbereiche definiert, in denen die Systemperformanz aufgrund der Verschmutzung eingeschränkt ist (b).

KAPITEL 6

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Einsatz von LiDAR-Sensoren im Automobil bringt durch den Einfluss äußerer Umgebungsbedingungen viele Herausforderungen mit sich. Durch Luftaufwirbelungen oder Niederschlag lagern sich Fremdpartikel oder Wassertropfen auf dem Sensor an und verschlechtern die optische Effizienz der Schutzscheibe. Die Zielsetzung in dieser Arbeit wurde in zwei Arbeitspakete unterteilt. Zum einen wurden mögliche auftretende Effekte durch anhaftende Verunreinigungen quantitativ untersucht, um Rückschlüsse auf potentielle Gefahren und Einschränkungen für den Einsatz von LiDAR-Sensoren in hochautomatisierten Fahrzeugen zu evaluieren. Weiterhin wurden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, wie die anhaftenden Verunreinigungen auf dem LiDAR-Sensor detektiert werden können, um gegebenenfalls Maßnahmen zum kontrollierten Einsatz zu treffen.

Die Verschmutzung der Schutzscheibe bewirkt mehrere Effekte wie die Entstehung blinder Bereiche im Sichtfeld oder die fehlerhafte Detektion von Störsignalen durch ein erhöhtes Systemrauschen. Der physikalische Hintergrund ist die Wechselwirkung der vom LiDAR ausgesendeten Strahlung mit den Störpartikeln, die durch Absorption, Streuung und Brechung in einer Reduzierung der Strahlungsleistung resultiert. Die Verlusteffekte werden durch die Verringerung der Transmission der Schutzscheibe beschrieben und bilden die Basis für die experimentelle Untersuchung der Degradation der Sensorreichweite.

Aufgrund statistischer Schwankungen verschiedener Mess- und Rauschgrößen kann die maximale Reichweite eines LiDAR-Sensors nicht direkt ermittelt werden. In der Arbeit wurde deshalb ein Verfahren vorgestellt, das die Bestimmung der Sensorreichweite aus den in den 3D-Punktwolken dargestellten Messpunkten ermöglicht. Das Verfahren wurde für die quantitative Untersuchung des Zusammenhangs von Sensorreichweite und Verschmutzungsgrad angewandt. Dabei wurde die Verschmutzung selbst durch homogene Verteilungen von Staub, Salz und Pollen nachgestellt. Zur Charakterisierung der Proben wurde ein System zur Bestimmung der Transmission vorgestellt, das sich insbesondere durch den zum LiDAR vergleichbaren Strahldurchmesser von 18 mm sowie die Unterdrückung von Streueffekten auszeichnet. Die Transmissionswerte der hergestellten Proben liegen im Bereich $50\% \leq T \leq 100\%$ und sorgen somit für eine Strahlungsabschwächung auf bis zu einem Viertel der ausgesendeten Strahlungsleistung.

Alle hergestellten Proben wurden nacheinander in einer kontrollierten Messumgebung vor einen LiDAR-Sensor platziert, um reale Bedingungen nachzustellen. Unter Variation des Abstandes zu einem definierten Messobjekt wird die Detektionswahrscheinlichkeit bei jeder Distanz statistisch ermittelt. Durch Festlegung definierter Schwellwerte bei 50 % und 95 % wurde die maximale Reichweite an den Schnittpunkten ausgelesen. Für beide Detektionsschwellen konnte ein linearer Zusammenhang von Proben-Transmission bzw. Verschmutzungsgrad und maximaler Reichweite gezeigt werden. Der untersuchte Transmissionsbereich zwischen 50 % und 100 % beinhaltet sowohl Grenzfälle bei starker Verschmutzung, die zum Beispiel bei längerem Stillstand des Fahrzeugs auftreten können, sowie sehr häufig auftretende Fälle wie die Anlagerung von Staubpartikeln aus der Luft. Da sich Wassertropfen durch die Unbeständigkeit nicht für das gezeigte Verfahren geeignet haben, wurde der Einfluss dieser

durch Transmissionsmessungen und Verknüpfung mit der linearen Relation hinzugefügt. Auch hier zeigten sich Transmissionswerte zwischen 50 % und 100 %. Aus dem linearen Zusammenhang sind somit sowohl für anhaftende feste Verunreinigungen als auch Wasser Reichweitereduzierungen um bis zu 60 % bei 50 % Transmission zu erwarten.

Insbesondere bei Regen treten die gezeigten Einschränkungen sehr häufig auf. Um die notwendigen Sensorspezifikationen dennoch zu jedem Zeitpunkt gewährleisten zu können, scheint die Implementierung einer Sensorreinigung unumgänglich. Dazu bietet sich die bereits an der Windschutzscheibe etablierte Kombination von Scheibenwischern und Spritzdüsen an, die gleichermaßen auf LiDAR-Sensoren übertragbar ist. Da für hochautomatisierte Fahrzeuge alle Funktionen automatisiert erfolgen müssen, wird zur Steuerung der Reinigungsfunktion eine Möglichkeit zur Erkennung der Verunreinigungen benötigt. In der Arbeit wurden deshalb mögliche Methoden zur Schmutzdetektion miteinander verglichen.

Der vielversprechendste Ansatz beruht auf der Nutzung der Schutzscheibe als Lichtleiter. Auf der Oberfläche anhaftende Verunreinigungen führen zu einer Lichtauskopplung aufgrund des veränderten Brechungsindex des äußeren Mediums. Der Ansatz wird bereits als Regensensor zur Steuerung der Scheibenwischer an Windschutzscheiben verwendet und wurde in einem Testsystem für die Integration in LiDAR-Sensoren angepasst. Die divergente Strahlung einer LED wird mit einer Prismenstruktur in die Schutzscheibe eingekoppelt und propagiert mittels interner Totalreflexionen auf einer in der Draufsicht linearen Bewegung durch diese hindurch. An einer weiteren Prismenstruktur koppelt die Strahlung aus und wird von einer Photodiode gemessen. Das System ist dann bei jeder Messung entlang der Ausbreitungsrichtung sensitiv. Durch Platzieren von Wassertropfen

mit definiertem Volumen konnte eine exponentielle Dämpfung des Messsignals bei steigender Benetzung gezeigt werden. Das System liefert somit zusätzlich zur Erkennung der Verunreinigung auch ein Maß für den Verschmutzungsgrad entlang der Propagationsrichtung. Gleichzeitig wurden auch weitere Verunreinigungen (Staub und Salz) getestet, die ebenfalls mit steigendem Verschmutzungsgrad einen höheren Signalverlust aufwiesen. Durch Kopplung des Messsystems an eine lineare Bewegung wird eine eindimensionale Ortsauflösung des Verschmutzungsgrades ermöglicht. Bei Integration in rotierende LiDAR-Scanner kann der Verschmutzungsgrad analog in Abhängigkeit des Rotationswinkels aufgelöst werden, sodass die Identifizierung blinder Bereiche des LiDAR-Sensors ermöglicht wird.

Das vorgestellte System bietet somit die Möglichkeit, verschiedene Arten von Verunreinigungen ortsabhängig zu detektieren und eignet sich sowohl für die Steuerung eines Reinigungssystems als auch für die Bewertung der Schutzscheibenoberfläche zur Identifikation blinder Bereiche. Aufgrund der hohen Sensitivität gegenüber Verunreinigungen bei gleichzeitig hoher Signalstärke weist das System nur eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Streulicht auf. Da die Sensitivität aber unterschiedlich für anhaftende Wassertropfen im Vergleich zu festen Verunreinigungen ist, kann beispielsweise nicht zwischen geringer Benetzung und starker Verschmutzung durch Staub unterschieden werden. Für die vollständige Automatisierung eines Reinigungssystems aus Scheibenwischer und Spritzdüsen wird diese Information allerdings benötigt, weshalb weitere Untersuchungen durchgeführt wurden.

Im abschließenden Kapitel der Arbeit wurde eine Methode zur Bestimmung des Brechungsindex des äußeren Mediums vorgestellt. Dazu wurde die divergente, in der Schutzscheibe propagierende Strahlung nach der Auskopplung durch eine Ortsabbildung mit einer

Zylinderlinse in die verschiedenen Propagationswinkel unterteilt. Da durch anhaftende Flüssigkeiten auf der Platte nur der Winkelbereich unterhalb des Grenzwinkels der Totalreflexion beeinflusst wird, konnte aus der ausgekoppelten Lichtverteilung der Grenzwinkel rekonstruiert und somit der Brechungsindex bestimmt werden. Das System wurde mit verschiedenen Saccharoselösungen im Brechungsindexbereich von 1,35568 – 1,43080 getestet und kalibriert, sodass systematische Ungenauigkeiten eliminiert werden konnten. Mit dem entwickelten Refraktometer konnte eine mittlere Genauigkeit der Brechungsindexbestimmung von $1,6 \cdot 10^{-3}$ erreicht werden. Durch Veränderung verschiedener Systemparameter wie der Brennweite oder der Detektorgeometrie können sowohl der Nutzbereich als auch die Auflösung angepasst werden, sodass Auflösungen bis zu $1 \cdot 10^{-5}$ möglich sind. Das vorgestellte Refraktometer kann für eine Vielzahl an Anwendungen variabel eingesetzt werden. Beispiele dafür sind die chemische Analyse von Flüssigkeiten oder auch die Verwendung in Lab-on-a-Chip-Systemen zur Stoffanalyse auf kleinen Substraten.

Für die Implementierung in LiDAR-Systeme ist die Brechungsindexbestimmung nicht zwingend notwendig. Zur Reinigungssteuerung wird nur eine Unterscheidung zwischen festen und flüssigen Verunreinigungen benötigt, um die Notwendigkeit von Spritzwasser vor dem Reinigungsvorgang festzulegen. Das System wurde deshalb zur Kosteneinsparung so vereinfacht, dass die beschriebene Winkelverteilung in zwei Bereiche oberhalb und unterhalb des kritischen Winkels für den Übergang zu Wasser unterteilt wird. Durch eine spezielle Platzierung zweier Photodioden können die definierten Bereiche ohne die zuvor benötigte Zylinderlinse voneinander getrennt werden. Mit dem entwickelten Testsystem können so anhaftende Wassertropfen von festen Verunreinigungen unterschieden werden. Aus der Datenevaluierung und der resultierenden Reinigungsentscheidung kann das System vollständig für die Steuerung eines Reinigungssystems

aus Scheibenwischer und Spritzdüsen eingesetzt werden. Die Integration in bestehende Systeme wird durch die Verwendung externer Prismen zur Strahlungskopplung erzielt, die auf die zu untersuchende Oberfläche aufgeklebt werden. Das System wurde hier speziell für die Reinigungssteuerung in LiDAR-Systemen optimiert, kann aber gleichermaßen in andere Sensoren oder als erweiterter Regensensor an Windschutzscheiben integriert werden.

Mögliche Ansätze zur Weiterarbeit liegen in der Umsetzung des vorgestellten Prototypen auf Laborbasis als Zusatzsensorik in einem LiDAR-Sensor mit Scheibenwischer und Spritzdüsen. Wird als LiDAR-Sensor ein rotierender Scanner verwendet, so kann das Funktionsprinzip an die Rotation gekoppelt werden. Die gezeigte Anbringung von Prismen zur Kopplung muss dazu auf die zylindrische Schutzscheibe angepasst werden. Zusätzlich muss die Lichtquelle durch eine infrarote Strahlungsquelle ersetzt werden, damit kein störendes Licht in die Fahrzeugumgebung emittiert wird. Besonders interessant ist die simultane Nutzung des Schmutzdetektionssystems an einem LiDAR-Sensor im Straßenverkehr. Durch die zusätzlich zur 3D-Information des LiDAR-Sensors gewonnenen Überwachung der Schutzscheibe können blinde Bereiche identifiziert und mit den Umgebungsdaten abgeglichen werden. Weiterhin treten bisher nicht betrachtete Effekte wie der Einfluss wechselnder Hintergrundstrahlung bei variierendem Tageslicht auf. Als Ansatz zur Rauschunterdrückung wurde bereits aus dem Stand der Technik die Differenzbildung mehrerer Messsignale vorgestellt, die eine interessante Ergänzung zum vorgestellten System darstellt. Eine weitere Möglichkeit zur Weiterarbeit bietet die Untersuchung der Signaldegradation des Schmutzdetektionssystems durch entstehende Kratzer, die durch die Reinigung nicht entfernt werden. Damit das System den Reinigungsvorgang nicht dauerhaft auslöst, muss eine dynamische Anpassung der Schwellwerte integriert werden.

Zusammenfassend liefert die vorliegende Arbeit eine umfassende Beschreibung möglicher Einschränkungen für die Nutzung von LiDAR-Sensoren in realen Umgebungsbedingungen. Anhaftende Verunreinigungen sorgen für eine erhebliche Reduzierung der Sensorreichweite, die die Integration einer Reinigungslösung am Sensor unausweichlich macht. Die damit verbundene Notwendigkeit einer Zusatztechnologie zur Detektion dieser Verunreinigungen wurde ausführlich diskutiert. Mit dem in dieser Arbeit entwickelten System auf Basis interner Totalreflexionen in der Schutzscheibe wird ein Ansatz zur Problemlösung vorgestellt, mit dem ein Reinigungssystem aus Scheibenwischer und Spritzdüsen vollautomatisiert kontrolliert werden kann. Das System eignet sich direkt für den Einsatz in LiDAR-Sensoren, kann gleichzeitig aber auch auf viele vergleichbare Sensoren übertragen oder an der Windschutzscheibe eingesetzt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] V. K. Kukkala, J. Tunnell, S. Pasricha, und T. Bradley, „Advanced Driver-Assistance Systems: A Path Toward Autonomous Vehicles,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, Vol. 7, Nr. 5, S. 18–25, 2018.
- [2] J.-C. Kedzia, B. Strand, und E. Abenius, „Simulation of Automotive Radar Sensors Extended to 77 GHz Long Range Detection,” in *GeMiC 2014; German Microwave Conference*. VDE, 2014, S. 1–2.
- [3] C. Weitkamp, *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*. Springer Science & Business, 2006, Vol. 102.
- [4] A. Ansmann, M. Riebesell, und C. Weitkamp, „Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar,” *Optics Letters*, Vol. 15, Nr. 13, S. 746–748, 1990.
- [5] J. Hecht, „Lidar for self-driving cars,” *Optics and Photonics News*, Vol. 29, Nr. 1, S. 26–33, 2018.
- [6] E. Ackerman, „Lidar that will make self-driving cars affordable [News],” *IEEE Spectrum*, Vol. 53, Nr. 10, S. 14, 2016.
- [7] S. Royo und M. Ballesta-Garcia, „An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles,” *Applied Sciences*, Vol. 9, Nr. 19: 4093, 2019.
- [8] M. E. Warren, „Automotive LIDAR Technology,” in *2019 Symposium on VLSI Circuits*. IEEE, 2019, S. C254–C255.
- [9] M. Koskinen, J. T. Kostamovaara, und R. A. Myllylae, „Comparison of continuous-wave and pulsed time-of-flight laser ranging techniques,” in *Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision VI*, Vol. 1614. International Society for Optics and Photonics, 1992, S. 296–305.

- [10] A. Wehr und U. Lohr, „Airborne laser scanning - an introduction and overview,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, Nr. 2-3, S. 68–82, 1999.
- [11] M. Kutila, P. Pyykönen, H. Holzhüter, M. Colomb, und P. Duthon, „Automotive LiDAR performance verification in fog and rain,” in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2018, S. 1695–1701.
- [12] B. Behroozpour, P. A. Sandborn, M. C. Wu, und B. E. Boser, „Lidar System Architectures and Circuits,” *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, Nr. 10, S. 135–142, 2017.
- [13] J. Illade-Quinteiro, V. M. Brea, P. López, D. Cabello, und G. Doménech-Asensi, „Distance Measurement Error in Time-of-Flight Sensors Due to Shot Noise,” *Sensors*, Vol. 15, Nr. 3, S. 4624–4642, 2015.
- [14] M.-C. Amann, T. M. Bosch, M. Lescure, R. A. Myllyläe, und M. Rioux, „Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement,” *Optical Engineering*, Vol. 40, Nr. 1, S. 10–19, 2001.
- [15] A. Wojtkiewicz, J. Misiurewicz, M. Nalecz, K. Jedrzejewski, und K. Kulpa, „Two-dimensional signal processing in FMCW radars,” in *XX th National Conference on Circuit Theory and Electronic Networks*, 1997, S. 475–480.
- [16] X. Zhang, J. Pouls, und M. C. Wu, „Laser frequency sweep linearization by iterative learning pre-distortion for FMCW LiDAR,” *Optics Express*, Vol. 27, Nr. 7, S. 9965–9974, 2019.
- [17] M. Buzinski, A. Levine, und W. Stevenson, „Performance characteristics of range sensors utilizing optical triangulation,” in *Proceedings of the IEEE 1992 National Aerospace and Electronics Conference (NAECON) 1992*. IEEE, 1992, S. 1230–1236.

- [18] H. G. Nguyen und M. R. Blackburn, „A Simple Method for Range Finding via Laser Triangulation,“ Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center, Tech. Rep., 1995.
- [19] X. T. Nguyen, H.-J. Lee, und H. Kim, „A High-Definition LIDAR System Based on Two-Mirror Deflection Scanners,“ *IEEE Sensors Journal*, Vol. 18, Nr. 2, S. 559–568, 2017.
- [20] Y. Li, „Beam deflection and scanning by two-mirror and two-axis systems of different architectures: a unified approach,“ *Applied Optics*, Vol. 47, Nr. 32, S. 5976–5985, 2008.
- [21] S. T. Holmström, U. Baran, und H. Urey, „MEMS laser scanners: a review,“ *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 23, Nr. 2, S. 259–275, 2014.
- [22] H. W. Yoo, N. Druml, D. Brunner, C. Schwarzl, T. Thurner, M. Hennecke, und G. Schitter, „MEMS-based lidar for autonomous driving,“ *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Vol. 135, Nr. 6, S. 408–415, 2018.
- [23] *ibeo LUX 4L / ibeo LUX 8L / ibeo LUX HD*, Ibeo Automotive Systems GmbH, Datenblatt, Jul. 2017.
- [24] *LD-MRS Produktfamilienübersicht*, SICK AG, Datenblatt, Jun. 2020.
- [25] *HDL-64E High Definition Real-Time 3D Lidar*, Velodyne Lidar, Inc., Datenblatt, 63-9194 Rev-J. 2018.
- [26] *RS-LIDAR-16 User's Manual*, RoboSense (Suteng Innovation Technology Co., Ltd.), Datenblatt, Jun. 2018.
- [27] *OS0 Ultra-Wide View High-Resolution Imaging Lidar*, Ouster, Inc., Datenblatt, REV: 2/23/2020. Feb. 2020.
- [28] W. S. Rabinovich, P. G. Goetz, M. W. Pruessner, R. Mahon, M. S. Ferraro, D. Park, E. F. Fleet, und M. J. DePrenger, „Two-dimensional beam steering using a thermo-optic silicon photonic

- optical phased array," *Optical Engineering*, Vol. 55, Nr. 11, S. 1–7, 2016.
- [29] G. F. Marshall und G. E. Stutz, *Handbook of optical and laser scanning*. Taylor & Francis, 2011.
- [30] P. McManamon, *LiDAR Technologies and Systems*. SPIE, 2019.
- [31] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, und C. Singer, *Handbook of driver assistance systems*. Springer International Publishing, 2016.
- [32] I. I. Kim, B. McArthur, und E. J. Korevaar, „Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications," in *Optical Wireless Communications III*, Vol. 4214. International Society for Optics and Photonics, 2001, S. 26–37.
- [33] J. H. Fairweather, A. F. Sidlow, und W. Faith, „Particle Size Distribution of Settled Dust," *Journal of the Air Pollution Control Association*, Vol. 15, Nr. 8, S. 345–347, 1965.
- [34] J. A. Curcio und C. C. Petty, „The Near Infrared Absorption Spectrum of Liquid Water," *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 41, Nr. 5, S. 302–304, 1951.
- [35] A. Filgueira, H. González-Jorge, S. Lagüela, L. Díaz-Vilariño, und P. Arias, „Quantifying the influence of rain in LiDAR performance," *Measurement*, Vol. 95, S. 143–148, 2017.
- [36] S. Hasirlioglu und A. Riener, „A General Approach for Simulating Rain Effects on Sensor Data in Real and Virtual Environments," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Vol. 5, Nr. 3, S. 426–438, 2019.
- [37] R. H. Rasshofer, M. Spies, und H. Spies, „Influences of weather phenomena on automotive laser radar systems," *Advances in Radio Science: ARS*, Vol. 9, S. 49, 2011.

- [38] C. Goodin, D. Carruth, M. Doude, und C. Hudson, „Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS,” *Electronics*, Vol. 8, Nr. 1: 89, 2019.
- [39] M. Bijelic, T. Gruber, und W. Ritter, „A benchmark for lidar sensors in fog: Is detection breaking down?” in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, 2018, S. 760–767.
- [40] J. Wojtanowski, M. Zygmunt, M. Kaszczuk, Z. Mierczyk, und M. Muzal, „Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders performance deterioration due to adverse environmental conditions,” *Opto-Electronics Review*, Vol. 22, Nr. 3, S. 183–190, 2014.
- [41] M. Jokela, M. Kutila, und P. Pyykönen, „Testing and Validation of Automotive Point-Cloud Sensors in Adverse Weather Conditions,” *Applied Sciences*, Vol. 9, Nr. 11: 2341, 2019.
- [42] T. Fersch, A. Buhmann, A. Koelpin, und R. Weigel, „The influence of rain on small aperture LiDAR sensors,” in *2016 German Microwave Conference (GeMiC)*. IEEE, 2016, S. 84–87.
- [43] J. R. V. Rivero, I. Tahiraj, O. Schubert, C. Glassl, B. Buschardt, M. Berk, und J. Chen, „Characterization and simulation of the effect of road dirt on the performance of a laser scanner,” in *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2017, S. 1–6.
- [44] SAE International, „Air Cleaner Test Code,” SAE Norm J726_200206 (June 27, 2002).
- [45] *OS01 Mid-Range High-Resolution Imaging Lidar*, Ouster, Inc., Datenblatt, REV: 2/3/2020. Feb. 2020.
- [46] F. Vachss, „Optical detector for windshield wiper control,” Mai 17 1994, US Patent 5,313,072.

- [47] J. S. Stam, J. H. Bechtel, und J. K. Roberts, „Moisture sensor and windshield fog detector using an image sensor,” Jul. 13 1999, US Patent 5,923,027.
- [48] J. Tenenbaum und P. A. Hochstein, „Rain sensor using statistical analysis,” Nov. 7 2000, US Patent 6,144,022.
- [49] J. J. Buschur, „Windscreen sensing and wiper control system,” Feb. 1 2000, US Patent 6,020,704.
- [50] G. Reime, „Rain sensor device for detecting the wetting and/or soiling of a windscreen surface,” Aug. 21 2007, US Patent 7,259,367.
- [51] H. C. Ockerse und J. K. Roberts, „Moisture sensor utilizing stereo imaging with an image sensor,” Mar. 1 2005, US Patent 6,861,636.
- [52] A. Yamashita, M. Kuramoto, T. Kaneko, und K. T. Miura, „A virtual wiper-restoration of deteriorated images by using multiple cameras,” in *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)(Cat. No. 03CH37453)*, Vol. 4. IEEE, 2003, S. 3126–3131.
- [53] Y. Tanaka, A. Yamashita, T. Kaneko, und K. T. Miura, „Removal of adherent waterdrops from images acquired with a stereo camera system,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. 89, Nr. 7, S. 2021–2027, 2006.
- [54] H.-C. Chen, H.-G. Lai, F.-C. Yang, H.-H. Chen, C.-L. Chung, und M.-T. Kao, „Windshield wiper controller, optical raindrop detector and detection method thereof,” Dez. 16 2014, US Patent 8,914,197.
- [55] S. Gormer, A. Kummert, S.-B. Park, und P. Egbert, „Vision-based rain sensing with an in-vehicle camera,” in *2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2009, S. 279–284.

- [56] F. Al Machot, M. Ali, A. H. Mosa, C. Schwarzlmüller, M. Gutmann, und K. Kyamakya, „Real-time raindrop detection based on cellular neural networks for ADAS,” *Journal of Real-Time Image Processing*, Vol. 16, Nr. 4, S. 931–943, 2019.
- [57] A. J. Heenan, R. J. Hazelden, M. J. Thompson, und A. J. Buchanan, „Rain detection apparatus and method,” Dez. 2 2014, US Patent 8,903,121.
- [58] M. Strauss, M. Komar, S. Hegemann, und D. Kroekel, „Method for evaluating image data of a vehicle camera taking into account information about rain,” Nov. 29 2016, US Patent 9,508,015.
- [59] M. Roser, „Modellbasierte und positionsgenaue Erkennung von Regentropfen in Bildfolgen zur Verbesserung von videobasierten Fahrerassistenzfunktionen.” Dissertation, KIT Scientific Publishing, 2012.
- [60] J. C. Halimeh und M. Roser, „Raindrop detection on car windshields using geometric-photometric environment construction and intensity-based correlation,” in *2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, 2009, S. 610–615.
- [61] M. Roser und A. Geiger, „Video-based raindrop detection for improved image registration,” in *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops*. IEEE, 2009, S. 570–577.
- [62] S. You, R. T. Tan, R. Kawakami, und K. Ikeuchi, „Adherent Raindrop Detection and Removal in Video,” in *2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 2013, S. 1035–1042.
- [63] Q. Wu, W. Zhang, und B. V. Kumar, „Raindrop detection and removal using salient visual features,” in *2012 19th IEEE International Conference on Image Processing*. IEEE, 2012, S. 941–944.

- [64] D. Eigen, D. Krishnan, und R. Fergus, „Restoring an image taken through a window covered with dirt or rain,” in *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. IEEE, 2013, S. 633–640.
- [65] H. Liao, D. Wang, und C. Yang, „Video-based Water Drop Detection and Removal Method for a Moving Vehicle,” *Information Technology Journal*, Vol. 12, Nr. 4, S. 569–583, 2013.
- [66] K. N. Choi, „Omni-directional rain sensor utilizing scattered light reflection by water particle on automotive windshield glass,” in *SENSORS, 2011 IEEE*. IEEE, 2011, S. 1728–1731.
- [67] J. Marek, H.-P. Trah, Y. Suzuki, I. Yokomori, J. Hesse, J. Gardner, und W. Göpel, *Sensors for automotive applications*. Wiley Online Library, 2003.
- [68] M. B. Purvis und R. S. Teder, „Window mounted optical moisture sensor having light pipes with distal ends,” Nov. 16 1993, US Patent 5,262,640.
- [69] R. S. Teder, D. L. Bomer, und M. A. Niver, „Mounting an optical moisture sensor on a windshield using a vacuum chamber device,” Sep. 17 1996, US Patent 5,556,493.
- [70] T. Schuler, „Sensor joined to a glass pane with a silicon gel,” Jun. 24 2003, US Patent 6,581,484.
- [71] R. Pientka, „Rain sensor for glass shut,” Sep. 22 1998, US Patent 5,811,793.
- [72] R. S. Teder, „Rain responsive windshield wiper control,” Jul. 11 1991, WO Patent 91/09756.
- [73] W. Yanyan, W. Jian, und Z. Zhifu, „Design of Intelligent infrared Windscreen Wiper based on MCU,” *Procedia Engineering*, Vol. 15, S. 2484–2488, 2011.

- [74] M. Schlegel und T. Schuler, „Smart Rain-Light-Tunnel Sensor,“ SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2002.
- [75] S. Gupta, D. M. Chougule, und A. Deshpande, „Development & Calibration of a Rain-Light Sensor and Controller for Indian Market,“ SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2010.
- [76] G. Michenfelder, R. Pientka, G. Riehl, S. Trunz, M. Burkart, K. Roth, und S. Schrodt, „Optischer Sensor,“ Jan. 10 2008, DE Patent 198 61 428 B4.
- [77] S. Kato und T. Yagi, „Development of a Rain-Light Sensor,“ *Mitsubishi Motors Technical Review*, Nr. 20, 2008.
- [78] S. Maeno und O. Terakura, „Regentropfen-Sensor mit einer plan-konvexen Linse,“ Feb. 12 2009, DE Patent 100 41 729 B4.
- [79] S. Maeno und O. Terakura, „Regentropfen-Sensor mit einer plan-konvexen Linse,“ Nov. 22 2012, Offenlegungsschrift DE 10 2011 101 744 A1.
- [80] N. R. Lynam, „Added Feature Automotive Mirrors,“ SAE Technical Paper, Tech. Rep., 1998.
- [81] G. Reime, „Regensensor zur Detektion von Feuchtigkeitstropfen,“ Mai 2 2007, EP Patent 1 187 743 B1.
- [82] Dialog Semiconductor, „IR Windshield Rain Sensor,“ 2018, Appl. Note AN-CM-219.
- [83] M. Klepac, V. Kadubec, A. Laegler, J. Eckstein, und B. Wyss, „Regensensor und Verwendung eines derartigen Sensors,“ Jun. 21 2018, Offenlegungsschrift DE 10 2016 124 854 A1.
- [84] R. Pientka, H. Meier, und F. Schabanel, „Sensoreinrichtung zur Erfassung des Benetzungs- oder Verschmutzungsgrades von Scheiben,“ Dez. 29 2004, EP Patent 0 869 043 B1.

- [85] M. Ucar, H. M. Ertunc, und O. Turkoglu, „The design and implementation of rain sensitive triggering system for windshield wiper motor,” in *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No. 01EX485)*. IEEE, 2001, S. 329–336.
- [86] M. Joshi, K. Jogalekar, D. Sonawane, V. Sagare, und M. Joshi, „A novel and cost effective resistive rain sensor for automatic wiper control: Circuit modelling and implementation,” in *2013 Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*. IEEE, 2013, S. 40–45.
- [87] K. C. Cheok, K. Kobayashi, S. Scaccia, und G. Scaccia, „A fuzzy logic-based smart automatic windshield wiper,” *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 16, Nr. 6, S. 28–34, 1996.
- [88] L. Alazzawi und A. Chakravarty, „Design and implementation of a reconfigurable automatic rain sensitive windshield wiper,” *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Vol. 8, Nr. 2, S. 73–82, 2015.
- [89] S. Dharmadhikari, N. Tamboli, N. Gawali, und N. Lokhande, „Automatic Wiper System,” *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering*, Vol. 4, Nr. 2, S. 15–18, 2014.
- [90] G. Inoue, „Windshield wiper control apparatus,” Mar. 14 1972, US Patent 3,649,898.
- [91] G. A. Nyberg, „Windshield wiper control system and a precipitation sensor therefor,” Mai 12 1987, US Patent 4,665,351.
- [92] P. W. Kithil, „New Applications of Capacitive Sensors In Laminated Automotive Glass,” SAE Technical Paper, Tech. Rep., 2001.
- [93] J. Schelten, R. Reinartz, und A. Szepesvary, „Sensor und Vorrichtung zur Messung der Benetzungsdichte von polaren Flüssigkeiten,” Mai 15 1996, Offenlegungsschrift DE 44 39 174 A1.

- [94] H. L. Armstrong, „Automated windshield wiper system,” Nov. 19 1985, US Patent 4,554,493.
- [95] R. N. Dean, A. Rane, M. Baginski, Z. Hartzog, und D. J. Elton, „Capacitive fringing field sensors in printed circuit board technology,” in *2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings*. IEEE, 2010, S. 970–974.
- [96] S. Žuk, A. Pietriková, und I. Vehec, „Possibilities of planar capacitive rain sensor manufacturing by thick film technology,” *Acta Electrotechnica et Informatica*, Vol. 18, Nr. 4, S. 11–16, 2018.
- [97] I. Bord, P. Tardy, und F. Menil, „Influence of the electrodes configuration on a differential capacitive rain sensor performances,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 114, Nr. 2, S. 640–645, 2006.
- [98] M. Arditi, L. Becet, und B. Ittah, „Automatically controlled cleaning device, notably for a motor vehicle windscreen,” Sep. 24 1997, EP Patent 0 512 653 B1.
- [99] E. Saurer, B. Duthe, und R. Jeanmonod, „Window, notably automobile vehicle windscreen, including an integrated ultrasonic device for detecting the presence of foreign bodies on one of its faces,” Jun. 11 1997, EP Patent 0 641 696 B1.
- [100] F. Wiget, „Ultrasonic detection device, notably for an automatically controlled windscreen cleaning system,” Okt. 8 1997, EP Patent 0 626 593 B1.
- [101] Y. Shiraishi, „Wiper speed control system for an automotive windshield wiper,” Nov. 15 1989, EP Patent 0 102 622 B1.
- [102] K. Kobayashi und Y. Tsutsui, „Vibration noise suppressive rain sensor for a wiper control system,” Mai 24 1989, EP Patent 0 115 822 B1.
- [103] K. Mori, Y. Shiraishi, und M. Kuribayashi, „An Intermittent Wiper System with a Raindrop Sensor,” SAE Technical Paper, Tech. Rep., 1985.

- [104] J. Canny, „A Computational Approach to Edge Detection,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Nr. 6, S. 679–698, 1986.
- [105] G. Beadie, M. Brindza, R. A. Flynn, A. Rosenberg, und J. S. Shirk, „Refractive index measurements of poly(methyl methacrylate) (PMMA) from 0.4-1.6 μm ,” *Applied Optics*, Vol. 54, Nr. 31, S. F139–F143, 2015.
- [106] G. M. Hale und M. R. Querry, „Optical constants of water in the 200-nm to 200- μm wavelength region,” *Applied Optics*, Vol. 12, Nr. 3, S. 555–563, 1973.
- [107] M. Querry, „Optical Constants of Minerals and Other Materials from the Millimeter to the Ultraviolet,” US Army Chemical Research, Development and Engineering Center (CRDC), Tech. Rep., 1987.
- [108] G. Ghosh, „Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals,” *Optics Communications*, Vol. 163, Nr. 1-3, S. 95–102, 1999.
- [109] M. Querry, „Optical Constants,” US Army Chemical Research, Development and Engineering Center (CRDC), Tech. Rep., 1985.
- [110] C. Zhou, W.-B. Lee, Y.-G. Lee, S.-S. Lee, S.-H. Son, und B.-S. Seol, „Fiber-Optic Refractometer Based on a Reflective Aspheric Prism Rendering Adjustable Sensitivity,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 37, Nr. 4, S. 1381–1387, 2019.
- [111] Z.-M. Qi, N. Matsuda, J. H. Santos, A. Takatsu, und K. Kato, „Prism-coupled multimode waveguide refractometer,” *Optics Letters*, Vol. 27, Nr. 9, S. 689–691, 2002.
- [112] VWR International GmbH, „Brechungsindex-Standards.” Online auf: <https://de.vwr.com/store/product/18546647/brechungsindex-standards> , Abgerufen am 21.04.2020.

- [113] *Mounted LED M590L3*, Thorlabs Inc., Datenblatt, 25125-S01, Rev C. Jan. 2018.
- [114] A. Banerjee, S. Mukherjee, R. K. Verma, B. Jana, T. K. Khan, M. Chakroborty, R. Das, S. Biswas, A. Saxena, und V. Singh, „Fiber optic sensing of liquid refractive index,“ *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 123, Nr. 1, S. 594–605, 2007.
- [115] J. Wan, Y. Lu, X. Li, Z. Zhang, J. Yang, G. Jiang, und F. Hu, „Liquid prism based refractometer,“ *Journal of Optics*, Vol. 19, Nr. 5, S. 055705, 2017.
- [116] *Technical Information Plexiglas GS / XT*, 211-1, Evonik Industries AG, Datenblatt, Jan. 2013.

A ANHANG

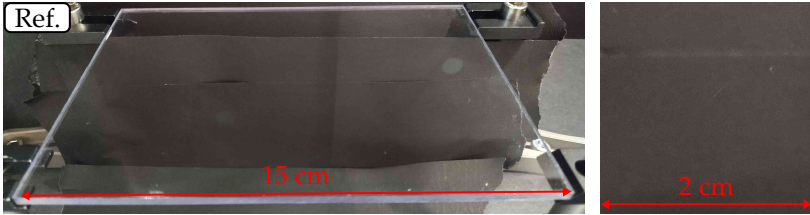
A.1 VERSCHMUTZUNGSPROBEN

Tabelle A.1 gibt eine Übersicht über alle in Kapitel 3 verwendeten Verschmutzungs- und Steinschlagproben mit den zugehörigen Transmissionswerten bei 850 nm. Die Abbildungen A.1-A.4 zeigen die Proben jeweils in der Schrägansicht sowie in einem ca. 2 cm x 2 cm großen Ausschnitt.

Tabelle A.1: Gemessene Transmissionswerte T_{850} und T_{ges} mit jeweiliger Standardabweichung s_{850} bzw. s_{ges} für alle hergestellten Verschmutzungsproben.

Bez.	Probe	$T_{850} / \%$	$s_{850} / \%$	$T_{\text{ges}} / \%$	$s_{\text{ges}} / \%$
Ref.	/	90,6	0,3	57,2	0,2
A1	Salz	84,3	0,8	53,2	0,5
A2	Salz	81,0	0,1	51,1	0,6
A3	Salz	74,8	0,9	47,2	0,6
B1	Staub	86,7	0,6	54,7	0,4
B2	Staub	78,7	0,5	49,7	0,3
B3	Staub	71,4	0,8	45,1	0,5
B4	Staub	61,8	0,6	39,0	0,4
P1	Pollen	76,7	0,9	48,4	0,6
P2	Pollen	66,9	1,4	42,2	0,9
P3	Pollen	66,3	0,7	41,8	0,4
P4	Pollen	57,9	1,0	36,5	0,6
P5	Pollen	48,4	2,2	30,5	1,4
X1	Steinschlag	86,2	0,6	54,4	0,4
X2	Steinschlag	74,9	3,9	47,3	2,5

Referenz (sauber)



Salz

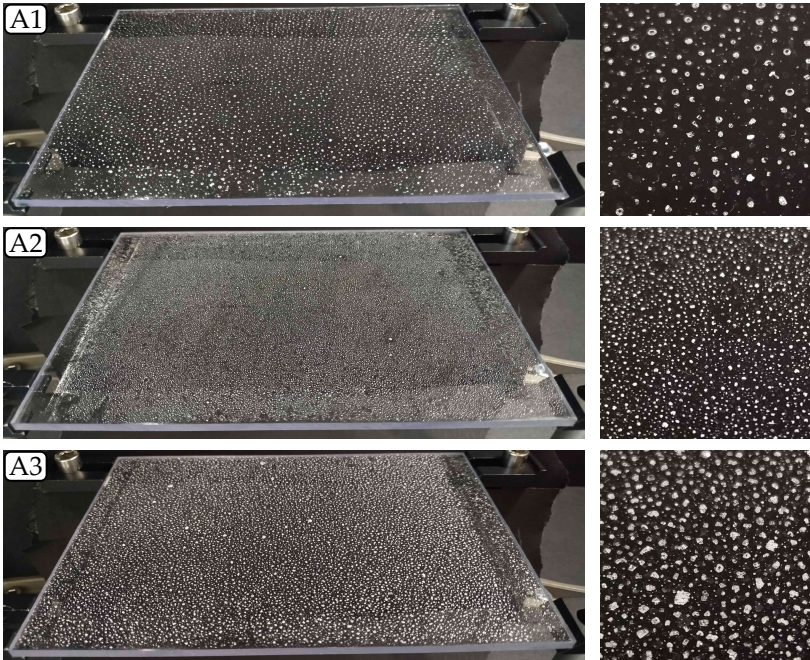


Abbildung A.1: Referenzplatte und hergestellte Salz-Proben (A1-A3) mit schwarzem Hintergrund. Gezeigt ist jeweils die gesamte Probe (links) und ein ca. 2 cm breiter Ausschnitt (rechts). In der oberen linken Ecke ist die Probenbezeichnung angegeben.

Staub

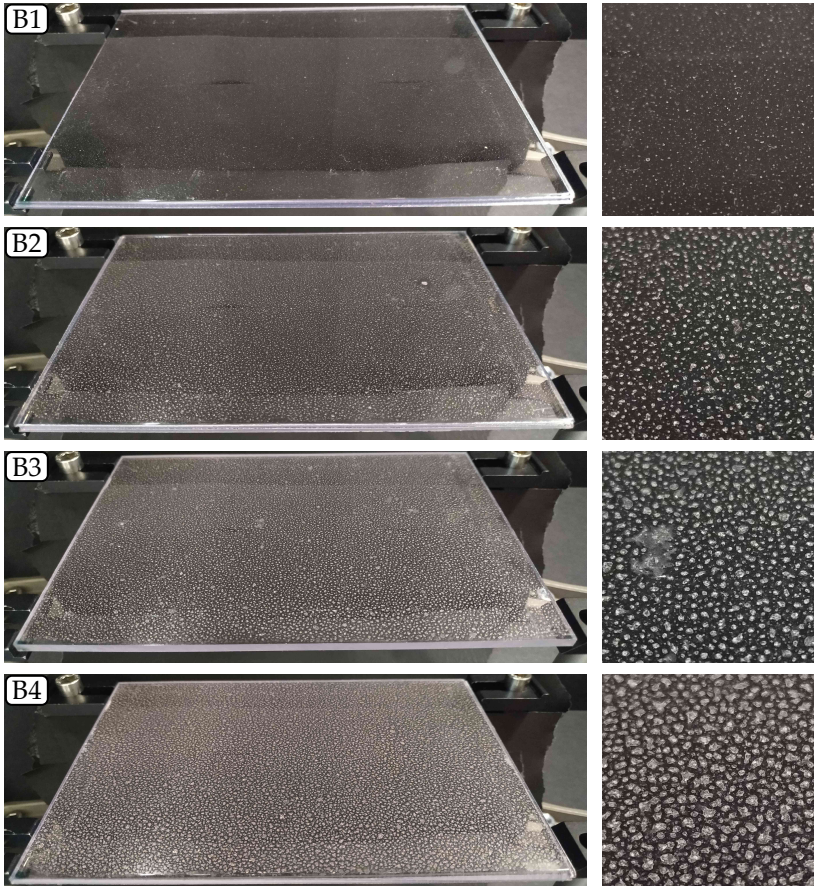


Abbildung A.2: Hergestellte Staub-Proben (B1-B4)

Pollen

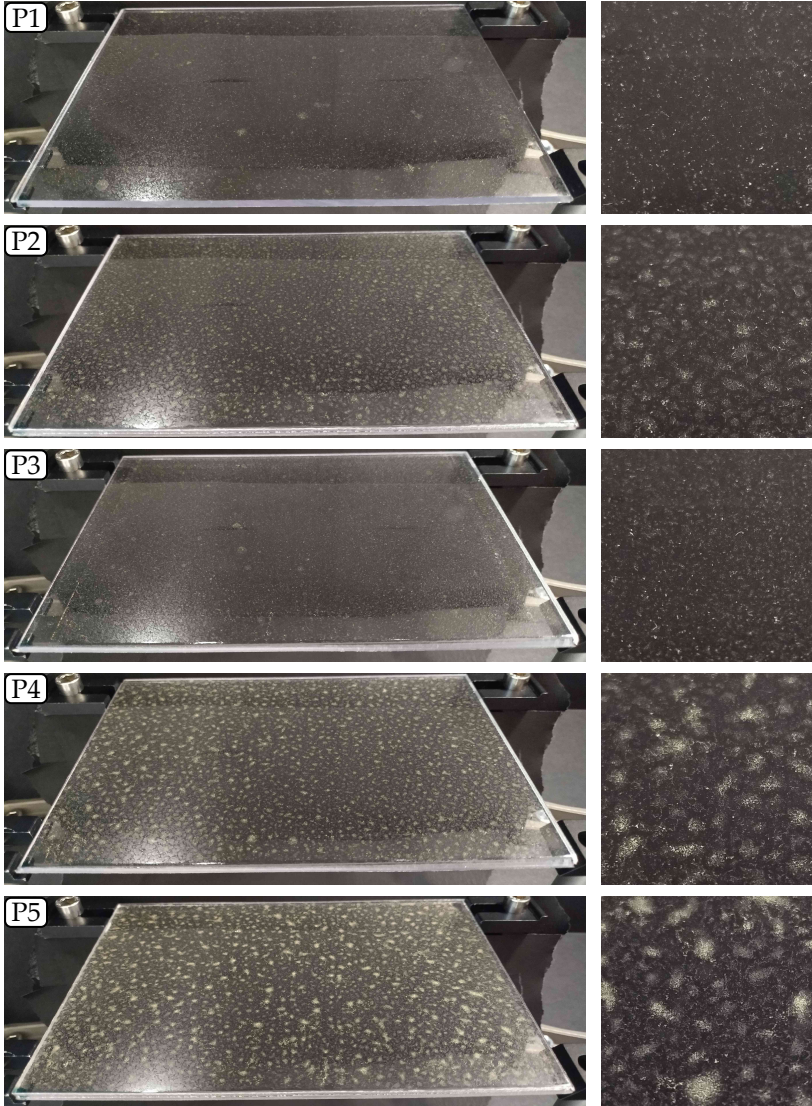


Abbildung A.3: Hergestellte Pollen-Proben (P1-P5)

Steinschlag

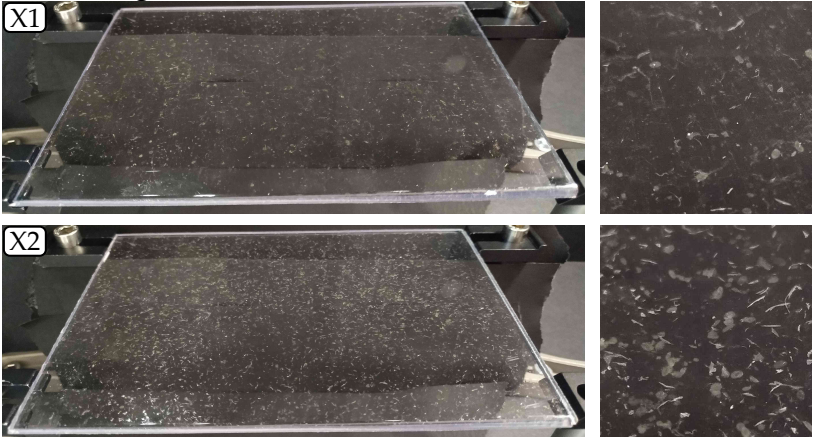


Abbildung A.4: Hergestellte Steinschlag-Proben (X1-X2)

A.2 LICHTLEITUNG IN DER SCHUTZSCHEIBE: SIMULATION

Durch die Einkopplung divergenter Strahlung in eine ausgedehnte Platte mit prismenförmigen Kanten wurde bereits in Kapitel 5 die Entstehung einer alternierenden Intensitätsverteilung (vgl. Abbildung 5.1) nach Auskopplung aus der Platte gezeigt. In diesem Abschnitt wird die Entstehung der Verteilung simulativ untersucht, um sie zu verstehen und nutzen zu können. Dazu wird die Strahlausbreitung unter mehrfachen internen Totalreflexionen in der Platte nach einem Raytracing-Modell berechnet. Zur Visualisierung des Modells zeigt Abbildung A.5 den Querschnitt einer Platte der Länge $L_1 + 2L_2$, in der sich Strahlen unter dem Propagationswinkel α ausbreiten. Dabei sind die beiden Außenkanten unter einem Winkel von 45° angeschrägt, damit das Licht unter geringeren Verlusten ein- und auskoppeln kann. Für die Simulation werden mehrere Vereinfachungen getroffen:

- **Eine Intensitätsverteilung der Abstrahlcharakteristik wird vernachlässigt:** Die Quelle wird als homogen angenommen. Simuliert wird nur die Anzahl an Strahlen, die auf den Schirm treffen. Die Summe der Strahlen wird als Intensität bezeichnet.
- **Vernachlässigung der Brechung an der Einkoppelfacette:** Es wird angenommen, dass sich alle Strahlen bereits in der Platte befinden.
- **Fixer Startpunkt:** Alle Strahlen starten an der gleichen Einkoppelstelle auf Höhe $\frac{d}{2}$. Die Strahlquelle entspricht somit einer Punktquelle.
- **Vernachlässigung des winkelabhängigen Transmissionsverlustes bei Ein- und Auskopplung:** Durch die schrägen Kanten sind die Einfallswinkel immer $< 45^\circ$. Für Brechungsindizes von beispielhaft $n_1 = 1$ und $n_2 = 1,5$ liegen die Transmissionsgrade

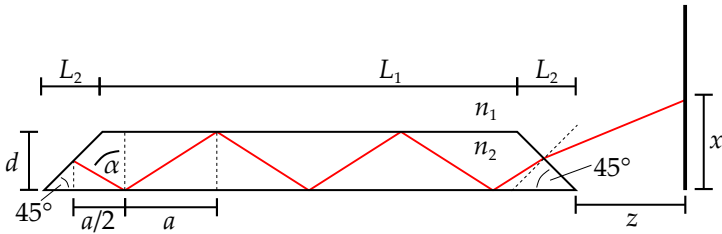


Abbildung A.5: Querschnitt durch eine Platte mit schrägen Kanten zur Ein- und Auskopplung von Licht. Ziel der Simulation ist die Berechnung des entstehenden Bildes auf dem Schirm im Abstand z .

nach den Fresnel-Gleichungen im Bereich von $T = 0,960$ bei 0° Einfallswinkel bis $T = 0,955$ bei 25° Einfallswinkel, sodass der Einfluss vernachlässigt werden kann.

- **Vernachlässigung der Absorption in der Platte:** Für Strahlen größerer Propagationswinkel ist der gesamte Lichtweg in der Platte größer als für Strahlen kleiner Propagationswinkel. Bei einer 10 cm langen Platte beträgt der Lichtweg beispielsweise ca. 10 cm bei $\alpha = 45^\circ$ und ca. 14 cm bei $\alpha = 80^\circ$. Nach Herstellerangaben [116] beträgt die Absorption durch eine 2 mm dicke PMMA-Platte weniger als 0,05 % bei einer Wellenlänge von 589 nm. Unter Benutzung des Lambert-Beer'schen Absorptionsgesetzes folgt für die beiden Strahlen bei 45° bzw. 80° Propagationswinkel eine Transmission von 96,5 % bzw. 97,5 %, sodass der Absorptionsverlust vernachlässigt werden kann.
- **Beschränkung auf Winkel $> 45^\circ$:** Dies ist insofern akzeptabel, da der Grenzwinkel der Totalreflexion für den Übergang von PMMA ($n_p = 1,49$ [105]) zu Luft bei ca. 42° liegt und der Winkelbereich $42^\circ < \alpha < 45^\circ$ für die Anwendung nicht von Relevanz ist.

Ziel der geometrischen Beschreibung ist es, den Weg des Strahls unter verschiedenen Propagationswinkeln α durch interne Totalreflexionen

durch die Platte, den Austritt aus der Platte sowie das Auftreffen auf einem Schirm im Abstand z in der Höhe x zu simulieren. Dazu müssen verschiedene Fälle unterschieden werden. Relevant sind nur die Strahlen, die vor Auftreffen auf die schräge Endfacette (am Ende von L_1) von der Unterkante in Richtung Oberkante propagieren, da sie ansonsten von der Endfacette in Richtung Unterkante reflektieren, dort auskoppeln und den Schirm nicht treffen. Somit wird zuerst unterschieden, ob der letzte Auftreffpunkte vor Ende der Länge L_1 auf der Ober- oder der Unterkante der Platte liegt. Dazu wird zunächst die Länge zwischen zwei aufeinanderfolgenden Reflexionen a berechnet mit

$$a = \tan(\alpha) \cdot d. \quad (\text{A.1})$$

Mit der Vereinfachung, dass alle Strahlen am Mittelpunkt der linken Außenkante starten ergibt sich für die Anzahl der Totalreflexionen N_{L_1} in der Platte bis zum Ende der Strecke L_1

$$N_{L_1} = \left\lfloor \frac{L_1 - \left(\frac{a+d}{2} - L_2\right)}{a} \right\rfloor, N_{L_1} \in \mathbb{N}. \quad (\text{A.2})$$

Mit N_{L_1} werden zwei relevante Fälle unterschieden:

Fall 1: N_{L_1} gerade \rightarrow letzter Auftreffpunkt auf der Unterkante

Fall 2: N_{L_1} ungerade \rightarrow letzter Auftreffpunkt auf der Oberkante

FALL 1: LETZTER AUFTREFFPUNKT UNTERKANTE

Findet die letzte Reflexion innerhalb der Länge L_1 auf der Unterkante der Platte statt, so treffen die Strahlen anschließend auf die schräge Außenkante und koppeln aus. Die gesamte Anzahl an Reflexionen N ist somit direkt durch N_{L_1} gegeben:

$$N = N_{L_1}. \quad (\text{A.3})$$

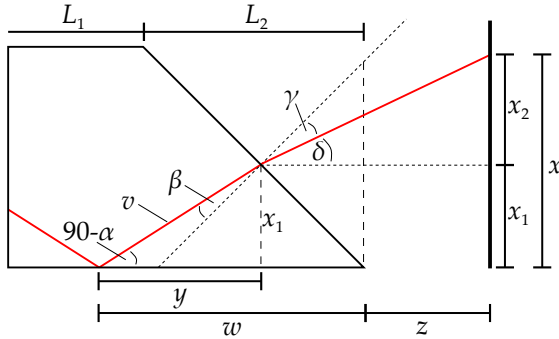


Abbildung A.6: Strahlverlauf bei Austritt aus der Platte und Auftreffen auf dem Schirm in der Höhe x .

Alle zur Berechnung des Austritts aus der Platte benötigten Größen sind in Abbildung A.6 skizziert. Zur Berechnung der Höhe x_1 wird die Hilfsgröße w benötigt, die sich durch

$$w = L_1 + L_2 - \left(N + \frac{1}{2}\right) \cdot a \quad (\text{A.4})$$

bestimmen lässt. Unter Verwendung des Sinussatzes kann somit die Kantenlänge v berechnet werden gemäß

$$\frac{v}{\sin(45^\circ)} = \frac{w}{\sin(45^\circ + \alpha)} \Rightarrow v = \frac{w \cdot \sin(45^\circ)}{\sin(45^\circ + \alpha)}. \quad (\text{A.5})$$

Damit ergibt sich für x_1

$$x_1 = \sin(90^\circ - \alpha) \cdot v. \quad (\text{A.6})$$

Mit v kann zusätzlich die Hilfsgröße y berechnet werden mit

$$y = \cos(90^\circ - \alpha) \cdot v. \quad (\text{A.7})$$

Zur Anwendung des Brechungsgesetzes für die Berechnung der Auskopplung wird der Winkel β als Einfallswinkel auf die schräge Fläche benötigt, der mit dem Propagationswinkel α durch $\beta = \alpha - 45^\circ$

verknüpft ist. Mit dem Brechungsgesetz wird der Austrittswinkel γ bestimmt durch

$$\frac{\sin(\beta)}{\sin(\gamma)} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \gamma = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \sin(\beta) \right). \quad (\text{A.8})$$

Mit $\delta = \alpha - 45^\circ$ folgt für die Länge x_2

$$x_2 = \tan(\delta) \cdot \left(L_1 + L_2 - \left(N + \frac{1}{2} \right) a - y + z \right). \quad (\text{A.9})$$

Die Auftreffhöhe auf dem Schirm im Abstand z ergibt sich somit aus

$$x = x_1 + x_2. \quad (\text{A.10})$$

FALL 2: LETZTER AUFTREFFPUNKT OBERKANTE

Die Strahlen, deren letzte Reflexion innerhalb der Länge L_1 auf der Oberkante liegen, müssen in zwei Fällen unterschieden werden, die in Abbildung A.7 dargestellt sind. Im Fall (a) liegt der letzte Auftreffpunkt auf der Oberkante innerhalb L_1 noch so weit vom Plattenende entfernt, dass für Strahlen bestimmter Propagationswinkel ein zusätzlicher Auftreffpunkt auf der Unterkante im Bereich L_2 noch möglich ist, sodass die Auskopplung wie in Fall 1 beschrieben erfolgt. Die Auftreffhöhe x kann dann analog berechnet werden. Dabei muss lediglich die zusätzliche Reflexion in der Platte berücksichtigt werden, sodass Gleichung (A.3) für diesen Fall angepasst werden muss zu

$$N = N_{L_1} + 1. \quad (\text{A.11})$$

Im in Abbildung A.7 (b) dargestellten Fall liegt die letzte Reflexion an der Oberkante so nah an der schrägen Auskoppelfläche, sodass diese bei Propagation von oben nach unten getroffen wird. Die Strahlen reflektieren dann an der Auskoppelfläche erneut und koppeln an der Unterkante der Platte aus. Infolgedessen treffen diese Strahlen nicht den Schirm und werden in der Simulation ausgeschlossen.

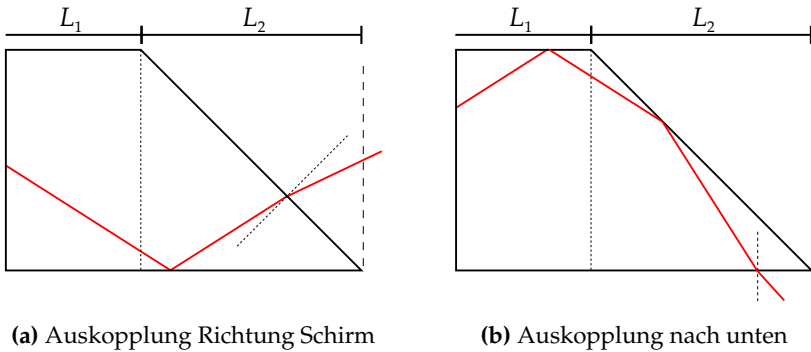


Abbildung A.7: Strahlverlauf und Austritt aus der Platte. Im Falle (a) passt die letzte Reflexion noch in den Bereich von L_2 , sodass der Strahl in Richtung Schirm auskoppelt, während im Fall (b) die Auskopplung nach unten erfolgt.

PUNKTQUELLE

Für die Berechnung der Auftreffhöhe x wird die Plattengeometrie ähnlich zu den verwendeten PMMA-Platten in Kapitel 5 durch $L_1 = 100 \text{ mm}$ und $L_2 = d = 3 \text{ mm}$ beschrieben. Die Brechungsindizes werden als $n_1 = 1$ (Luft) und $n_2 = 1,49$ (PMMA, $\lambda = 600 \text{ nm}$) festgelegt, da im Experiment rotes Licht verwendet wird. Der Winkelbereich wird in Schritten von $0,0001^\circ$ im Bereich $45^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ variiert.

Das Ergebnis ist in Abbildung A.8 für einen Schirmabstand von $z = 10 \text{ cm}$ gezeigt. Über den gesamten Winkelbereich treffen Strahlen mit größerem Propagationswinkel weiter unten auf dem Schirm auf. Es treten periodische Sprünge auf, bei denen die Strahlen schlagartig weiter oben auftreffen. Diese Sprünge sind direkt mit der Plattendicke verbunden und treten genau dann auf, wenn sich bei größer werdendem Propagationswinkel die Anzahl der Reflexionen in der Platte und somit auch der Austrittspunkt auf der Endfacette ändert. Im Übergangsbereich der Sprünge treffen keine Strahlen auf den Schirm. Diese

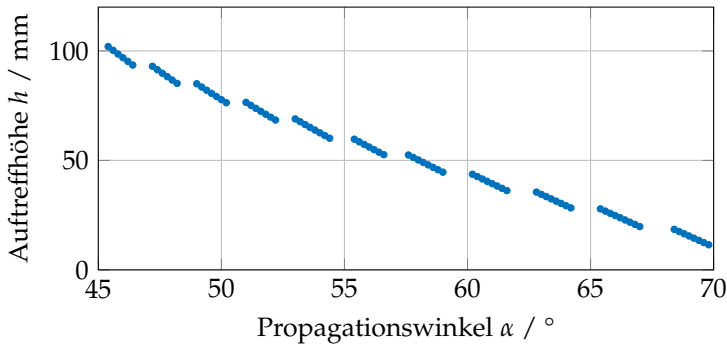


Abbildung A.8: Auftreffhöhe der simulierten Strahlen auf einem Schirm im Abstand $z = 10 \text{ cm}$. In periodischer Abfolge werden bestimmte Winkelbereiche nicht auf den Schirm abgebildet.

Bereiche entsprechen genau den im vorherigen Abschnitt gezeigten Fällen, bei denen die Strahlen nach unten aus der Platte auskoppeln.

Aus der in Abbildung A.8 gezeigten Darstellung kann die zu untersuchende alternierende Intensitätsverteilung nur schwierig interpretiert werden. Deshalb ist es zweckmäßig, die Ergebnisse als Intensitätsprofil darzustellen. Im vorgestellten Modell kann die Intensität allerdings nicht explizit berechnet werden. Als erste Näherung wird die Anzahl an Strahlen, die einen bestimmten Ort auf dem Schirm treffen, gezählt. Dazu werden die in der Simulation berechneten Ortswerte zunächst auf eine Genauigkeit von $0,1 \text{ mm}$ gerundet. Dadurch wird auch die Ortsauflösung entsprechend limitiert, was für die folgenden Betrachtungen ausreicht. Anschließend wird für jeden (nun diskreten) Ort die Anzahl an Datenpunkten gezählt. Der so ermittelte Wert wird als Amplitude bezeichnet und entspricht quantitativ nicht der physikalischen Intensität. Da der qualitative Verlauf für die weiteren Untersuchungen hinreichend ist, wird dieser weiterhin als Intensitätsverlauf bezeichnet. Das Ergebnis ist für die in Abbildung A.8 gezeigte

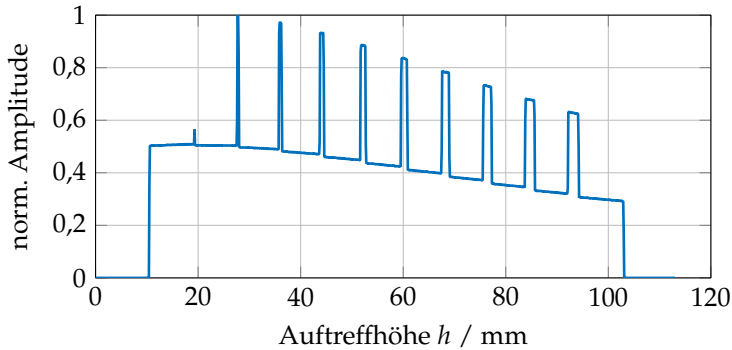


Abbildung A.9: Simulierter Intensitätsverlauf auf dem Schirm. Eine Intensitätsmodulation mit wechselnden Maxima und Minima ist erkennbar, die im Ansatz den zu erwartenden Hell-Dunkel-Wechsel aus Abbildung 5.1 beschreibt.

Verteilung in Abbildung A.9 dargestellt. Zur besseren Sichtbarkeit sind die berechneten Punkte durch Linien verbunden. Die erwartete alternierende Verteilung ist bereits erkennbar. Dabei treten periodisch Maxima auf, die auf dem Schirm nach oben hin immer breiter werden. Insgesamt ist die Intensität im oberen Schirmbereich (entsprechend größerer Propagationswinkel) geringer, da dort weniger Strahlen den Schirm treffen.

Aufgrund der bisherigen Vereinfachung, dass alle Strahlen vom Mittelpunkt der Eintrittsfläche aus starten, sind die Modulationen im bisherigen Muster noch sehr scharf. Die im Messaufbau verwendete LED ist aber keine Punktquelle und kann somit durch die Simulation nicht nachgestellt werden. Außerdem ist eine diffuse Quelle vor der Einkopplung wünschenswert, um die Lichtverteilung innerhalb der Platte zu homogenisieren. Im folgenden Kapitel wird dementsprechend der Startpunkt auf der Einkoppelendfläche variiert.

DIFFUSE QUELLE

Ausgangspunkt der Simulation ist wie im vorherigen Abschnitt die Berechnung der Anzahl an Totalreflexionen in der Platte. Die notwendigen Anpassungen sind in Abbildung A.10 skizziert. Zur Variation des Startpunktes wird in der Simulation die Starthöhe s , beispielhaft skizziert für die beiden Fälle s_1 und s_2 , angepasst. Aus den Starthöhen kann die Länge L_s bis zur ersten Reflexion an der Unterkante berechnet werden mit

$$L_s = s \tan(\alpha) + \frac{s}{\tan(45^\circ)} = s(1 + \tan(\alpha)). \quad (\text{A.12})$$

Aufgrund der veränderten Gesamtlänge wird die Anzahl an Reflexionen N_{L_1} vor Ende der Strecke L_1 (siehe Gleichung (A.2)) korrigiert zu

$$N_{L_1} = \left\lfloor \frac{L_1 + L_2 - L_s}{a} \right\rfloor, N_{L_1} \in \mathbb{N}. \quad (\text{A.13})$$

Die Unterscheidung, ob der letzte Auftreffpunkt in der Platte auf der

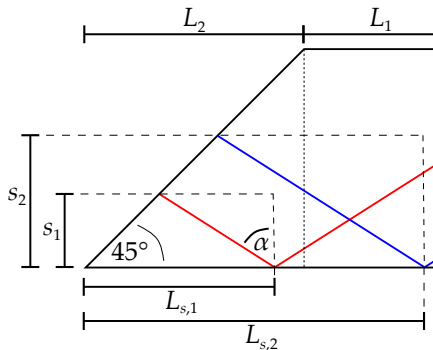


Abbildung A.10: Variation der Starthöhe s . Beispielhaft gezeigt sind zwei Strahlen mit Propagationswinkel α und Starthöhen s_1 (rot) und s_2 (blau). Zur Berechnungen der Gesamtzahl an Reflexionen in der Platte wird die Strecke $L_{s,i}$ bis zur ersten Reflexion berechnet.

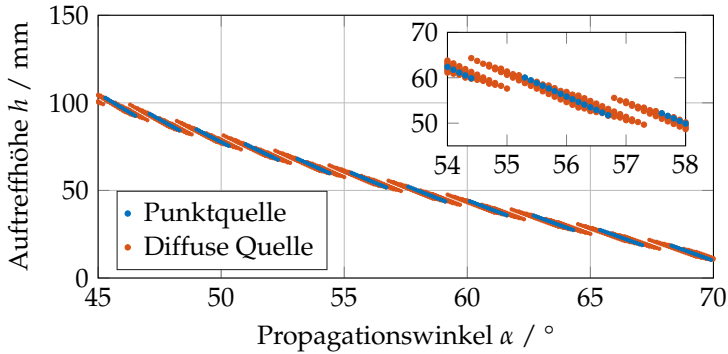


Abbildung A.11: Auftreffhöhe der simulierten Strahlen auf einem Schirm im Abstand von $z = 10$ cm für eine Punktquelle in blau und eine diffuse Quelle in rot. Durch die Variation des Startpunktes verschmieren die Stufen immer weiter, sodass keine Winkelbereiche mehr entstehen, für die kein Strahl den Schirm trifft.

Ober- oder der Unterkante liegt, bleibt weiterhin notwendig. Somit erfolgen alle Berechnungen analog zum vorherigen Kapitel mit angepasster Anzahl an Totalreflexionen N . Die Starthöhe s wird in den Grenzen $0 \text{ cm} \leq s \leq d$ mit einer Auflösung von $0,01$ mm variiert. Die Plattenparameter $L_1 = 100$ mm, $L_2 = d = 3$ mm sowie die Brechungsindizes $n_1 = n_{\text{Luft}} = 1$ und $n_2 = n_{\text{PMMA}} = 1,49$ bleiben unverändert. Berechnet werden die Auftreffhöhen für $45^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ mit einer Auflösung von $0,0001^\circ$. Abbildung A.11 zeigt die berechneten Auftreffhöhen im Abstand $z = 10$ cm in Abhängigkeit des Propagationswinkels für alle Starthöhen s (diffuse Quelle) in rot und für $s = 0,5 \cdot d$ (Punktquelle) in blau. Zur Übersicht ist der Winkelbereich von $54^\circ - 58^\circ$ vergrößert dargestellt. Durch die Anpassung der Starthöhe s werden zusätzlich zu den Treffern mit einer Punktquelle als Ausgangspunkt (blau) weitere Positionen auf dem Schirm in beide Richtungen getroffen. Die vorher leicht erkennbaren Stufen verschmieren zu einer kontinuierlicher werdenden Verteilung. Außerdem entstehen keine Winkelbereiche

mehr, für die keine Strahlen auf den Schirm treffen. Trotzdem treten weiterhin Übergangsbereiche auf, in denen die Anzahl an Punkten geringer ist.

Aus der Winkelverteilung kann analog zum vorherigen Abschnitt eine Intensitätsverteilung ermittelt werden, die der Anzahl an auftreffenden Strahlen auf definierten Höhen entspricht. Die entstehende Verteilung wird zweckmäßig normiert, da die Anzahl mit den Eingangsparametern verknüpft ist und die Simulation keine Absolutwerte liefert. Die Intensitätsverteilung ist in Abbildung A.12 im Vergleich der Punktquelle (blau) zur diffusen Quelle (rot) gezeigt. Die vorher scharfen Kanten gehen in einen wechselnden Verlauf von steigenden und fallenden Flanken gleicher Frequenz über, die nahezu linear verlaufen. Insgesamt wird der Kontrast zwischen Maxima und Minima geringer. Anzahl und Position der Maxima und Minima bleibt im Vergleich zur Simulation mit einer Punktquelle gleich.

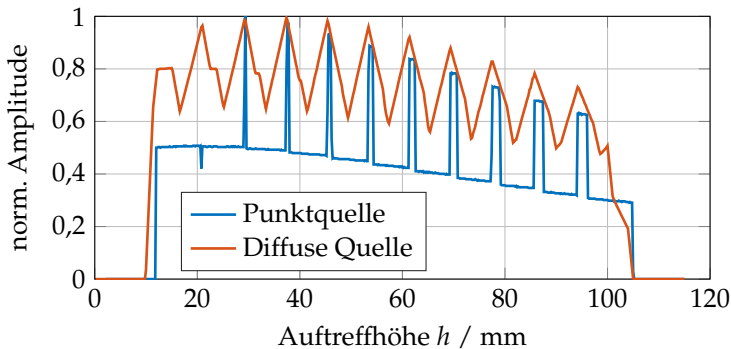
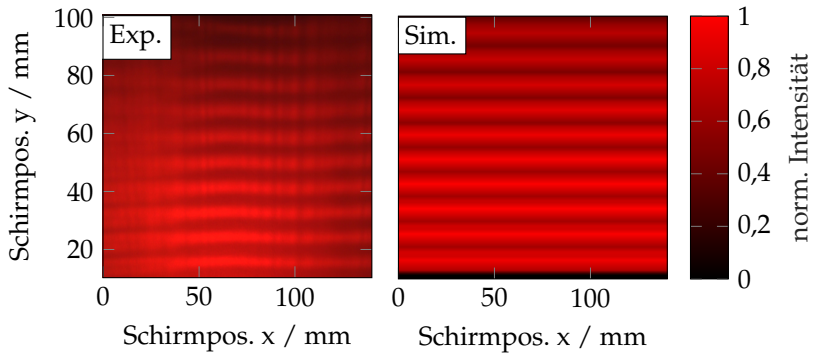


Abbildung A.12: Simulierter Intensitätsverlauf auf dem Schirm. Die Intensität weist eine Modulation von nahezu linear steigenden und fallenden Flanken auf, die die aus Abbildung 5.1 erwartete Intensitätsverteilung darstellen.

VALIDIERUNG DER SIMULATION

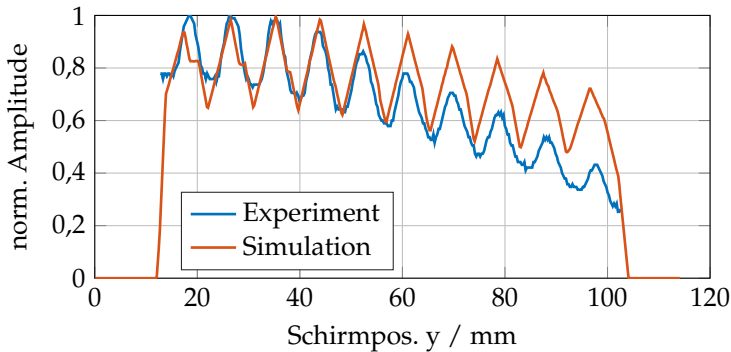
Das simulierte Profil entspricht der Intensitätsverteilung in vertikaler Schirmrichtung, die zur Erzeugung eines 2D-Intensitätsbildes in horizontale Richtung erweitert wird. Als Vereinfachung werden die Werte in horizontaler Richtung als gleich bleibend betrachtet. Das in Abbildung 5.1 gezeigte Intensitätsbild kann aufgrund des Betrachtungswinkels nicht genutzt werden. Zum Vergleich von Simulation und Experiment wird das simulierte Szenario ($L_1 = 92,2$ mm, $L_2 = d = 3$ mm, $n_1 = n_{\text{Luft}} = 1$, $n_2 = n_{\text{PMMA}} = 1,49$, $z = 10$ cm) im Labor nachgestellt (siehe Abbildung 5.1). Als Lichtquelle wird eine rote LED (Thorlabs M617L3) verwendet, die Licht mit einem vollen Öffnungswinkel von 80° emittiert. Vor Einkopplung in die Platte wird eine einfache Diffusorfolie zur Erzeugung einer homogenen Winkelverteilung verwendet. Aufgrund der hohen Divergenz wird experimentell der maximal mögliche Winkelbereich ausgeleuchtet. Die Simulation wird dennoch auf den Bereich $45^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ begrenzt, da für Propagationswinkel $> 70^\circ$ der Einfallswinkel $> 39^\circ$ sein muss. Dazu müsste die Quelle unterhalb der Plattenunterkante liegen, was in einer möglichen Anwendung zur Schmutzdetektion nicht realisierbar wäre, da dies einer Position außerhalb der Schutzscheibe entspricht.

Abbildung A.13 zeigt den Vergleich der gemessenen Intensitätsverteilung in (a) zum simulierten Muster in (b). In Abbildung A.13c ist der Querschnitt bei $x = 65$ mm dargestellt. Insgesamt weist die gemessene Intensitätsmodulation eine ähnliche Charakteristik im Bezug zu Amplitude und Frequenz der Oszillationen auf. Auch der simulierte Einbruch der Intensität zum oberen Schirmende hin ist in der Messung deutlich zu erkennen. Unterschiede liegen insbesondere in der Schärfe des Musters. Während die Simulation weitestgehend einen Wechsel von steigenden und fallenden linearen Verläufen aufweist, entspricht die gemessene Intensität eher einer Sinusfunktion.



(a)

(b)



(c) Querschnitt bei $x = 65$ mm.

Abbildung A.13: (a) Aufgenommenes Kamerabild. (b) Simuliertes Muster. (c) Querschnitt durch die Intensitätsprofile bei $x = 65$ mm. Die Profile stimmen in Frequenz und Amplitude weitestgehend überein, sind aber aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten der Platte in (a) weniger scharf definiert.

Weiterhin ist in Abbildung A.13a erkennbar, dass das Muster eine sehr starke Variation in x -Richtung aufweist. Diese Variation entsteht insbesondere durch Ungenauigkeiten in der Fertigung der verwendeten PMMA-Platte. Dazu zählt, dass die schrägen Kanten zur Ein- und Auskopplung hohe Ungenauigkeiten an den Rändern aufwei-

sen, sodass sich der Auskoppelwinkel in den Randbereichen von der Auskopplung aus der Plattenmitte leicht unterscheidet. Durch eine unsaubere Politur der Kanten entlang der schrägen Kante entstehen Bereiche (die dann in Abbildung A.13a Querschnitten in x -Richtung entsprechen), die zu einer Verringerung der Intensität auf der entsprechenden Kamerazeile (also alle Höhen auf dem Schirm) führen.

Als Vereinfachung wurde in der Simulation der Verlauf in x -Richtung erweitert, sodass der Ursprung aller auf dem Schirm auftreffenden Strahlen ebenfalls in x -Richtung verschiebt. Auf der Kamera allerdings liegt der Ursprung der Strahlen am Diffusor unmittelbar vor der LED. Von diesem ausgehend propagieren die Strahlen schräg mittels Totalreflexionen durch die Platte, sodass das entstehende Muster zusätzlich in x -Richtung verzerrt wird.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass die Intensitätsmodulationen insbesondere durch die Plattengeometrie bestimmt sind. Durch den Wechsel der Anzahl an Totalreflexionen in der Platte entstehen aufgrund der endlichen Plattendicke Sprünge auf dem Schirm, die bei Integration den alternierenden Verlauf erzeugen. Strahlen unterschiedlicher Propagationswinkel werden folglich nicht scharf auf dem Schirm abgebildet, sodass eine direkte Zuordnung der Intensität zu einzelnen Winkeln ohne weitere optische Elemente nicht mehr möglich ist. Abhängig von der Plattengeometrie und der Schirmdistanz erfolgen die Sprünge allerdings nur über Teilbereiche, sodass Strahlen fester Propagationswinkel auch nur in definierten Bereichen auftreffen. Die Intensitätsverteilung auf dem Schirm entspricht somit zwar keiner scharfen Abbildung, kann aber als eine teilweise geordnete Abbildung der Winkelverteilung angesehen werden.

ABKÜRZUNGEN

ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems (Fahrerassistenzsysteme)
AMCW	amplitude-modulated continuous-wave
CCD	charge-coupled device
cw	continuous-wave
FFT	fast Fourier transform (schnelle Fourier-Transformation)
FMCW	frequency-modulated continuous-wave
FoV	Field of View (Sichtfeld)
FWHM	full width at half maximum (Halbwertsbreite)
LD	Laserdiode
LED	light-emitting diode
LiDAR	Light Detection and Ranging
M(O)EMS	mikro-(opto)elektro-mechanisches System
ND-Filter	Neutralsichtfilter
OPA	optical phased array

PC	Polycarbonat
PD	Photodiode
PMMA	Polymethylmethacrylat
Radar	Radio Detection and Ranging
SNR	signal-to-noise ratio (Signal-Rausch-Verhältnis)
TIR	total internal reflection (interne Totalreflexion)
ToF	time-of-flight

BETREUTE ARBEITEN

G. Gröninger

Beurteilung und Messauswertung eines LiDAR-Systems unter Beeinflussung von Verschmutzungen

Bachelorarbeit, Hochschule Heilbronn (2019)

M. Schmidt

Zweidimensionale Detektion von Verschmutzungen auf LiDAR-Sensoren

Masterarbeit, Hochschule Karlsruhe (2020)

M. Herbst

Entwicklung eines automatisierten Reinigungssystems für LiDAR-Sensoren basierend auf optischer Überwachung des Sensorschutzglases

Masterarbeit, Universität Stuttgart (2020)

PUBLIKATIONEN

Journals

M. Trierweiler, T. Peterseim und C. Neumann

„Easy integrable refractometer for liquids on extended surfaces,“ *Review of Scientific Instruments*, Vol. 91, Nr. 6, S. 065110, 2020.

Konferenzbeiträge

M. Trierweiler, P. Caldelas, G. Gröninger, T. Peterseim und C. Neumann

„Influence of sensor blockage on automotive LiDAR systems,“ in *2019 IEEE SENSORS*. IEEE, 2019, S. 1-4.

M. Trierweiler, T. Peterseim und C. Neumann

„Automotive LiDAR pollution detection system based on total internal reflection techniques,“ in *Light-Emitting Devices, Materials, and Applications XXIV*, Vol. 11302, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2020, S. 135-144.

Patentanmeldungen

M. Trierweiler und T. Peterseim

Optisches System mit einem Verschmutzungserkennungssystem, Fahrzeug mit einem optischen System und Verfahren für ein optisches System
Offenlegungsschrift. Robert Bosch GmbH. Anmeldetag: 12.10.2018.
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2018 217 467 A1

M. Trierweiler und T. Peterseim

Optisches System mit einem Verschmutzungserkennungssystem, Fahrzeug mit einem optischen System und Verfahren für ein optisches System

Offenlegungsschrift. Robert Bosch GmbH. Anmeldetag: 12.10.2018.
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2018 217 484 A1

M. Trierweiler und T. Peterseim

Optisches System mit einem Verschmutzungserkennungssystem, Fahrzeug mit einem optischen System und Verfahren für ein optisches System

Offenlegungsschrift. Robert Bosch GmbH. Anmeldetag: 12.10.2018.
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2018 217 466 A1

M. Trierweiler und T. Peterseim

Optisches System mit einem Verschmutzungserkennungssystem, Fahrzeug mit einem optischen System und Verfahren für ein optisches System

Offenlegungsschrift. Robert Bosch GmbH. Anmeldetag: 12.10.2018.
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2018 217 482 A1

M. Trierweiler, M. Baier und J. Hasselbach

Optisches System umfassend ein Verschmutzungserkennungssystem

Offenlegungsschrift. Robert Bosch GmbH. Anmeldetag: 12.10.2018.
Veröffentlichungsnummer: DE 10 2018 217 488 A1

M. Trierweiler

Sensor Apparatus Comprising a Sensor Element and a Cover Lens

Internationale Offenlegungsschrift. Robert Bosch GmbH. Anmeldetag: 05.03.2020. Veröffentlichungsnummer: WO 2020/182589 A1 und DE 10 2019 203 230 A1

DANKSAGUNG

Mit dem Abschluss der Dissertation neigt sich eine spannende und intensive Zeit dem Ende entgegen. Dafür möchte ich mich bei vielen Menschen bedanken, die zum erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für die Aufnahme als Doktorand und die fachliche und vor allem auch moralische Unterstützung in den vergangenen Jahren.

Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der LiDAR-Entwicklung der Robert Bosch GmbH. Ich danke allen Kollegen aus dem Projekt für die Zusammenarbeit und die schönen Erinnerungen. Meinem Betreuer Dr. Tobias Peterseim danke ich für die fachliche und persönliche Unterstützung.

Meinen Mitdoktoranden Matthias Baier, Jürgen Hasselbach, Martin Kastner, Scarlett Lipp und Marco Nägele danke ich ganz besonders für das gemeinsame Durchstehen vieler Höhen und auch Tiefen, die ich allein nicht hätte bewältigen können. Darin einschließen möchte ich Dr. Norman Haag, der neben der fachlichen Hilfestellung durch seine positive Überzeugung immer dafür gesorgt hat, die Dinge aus einem anderen Blickwinkel zu betrachten.

Für das Korrekturlesen danke ich meiner Schwester Lisa, Matthias Baier und Dr. Daniel Molter, deren Anmerkungen eine große Hilfe waren, um die letzten Feinheiten der Arbeit umzusetzen.

Ganz besonders danke ich meiner Familie und Freunden für die Unterstützung, motivierende Worte und auch die notwendige Ablenkung in den letzten Jahren.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Freundin Astrid für all die Hilfe, die stetige Motivation und die Ermutigung bedanken, mit der sie einen großen Anteil an der Fertigstellung der Arbeit getragen hat.