

---

# Diplomarbeit

---

Herr  
**David Scheiber**

**Verschmutzungseinfluss auf  
kamerabasierte Fahrfunktionen**

**Betreuer:** Prof. Dr.-Ing. Jörg Hübler

**04.01.2024**

**Bibliografische Angaben**

Nachname, Vorname: Scheiber, David

Thema der Diplomarbeit: Verschmutzungseinfluss auf kamerabasierte Fahrfunktionen

Topic of thesis: Influence of pollution on camera-based driving functions

**Abstract:**

The literature search has shown that there is currently no standardized solution for testing and evaluating sensor performance or ADAS functions with regard to contamination and other environmental influences. Looking to the future, there will be more and more vehicles on the road without drivers. For these vehicles, sensor-based detection of the environment and thus also detection of sensor performance is extremely important in order to ensure safe operation. This leads to the need of suitable standardized tests and to the problem definition of this thesis. The goal of this thesis is the development of a methodology for experimentally mapping realistic and easily reproducible contamination conditions on sensors and vehicles and to evaluate their effect. This should make it possible to test the detection performance as a function of the contamination level. Suitable soiling methods must also be developed and applied in an experimental model test. The focus of this thesis is to generate a method specifically for camera-based systems. The methodology to be developed should be applicable to any type of camera-based driver assistance system. The aim should be to easily and reproducibly determine where the system limits lie and, depending on this, to be able to give approvals for the soiling resistance of such systems so that they can withstand everyday use and be operated safely.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichen .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	2
1.3 Vorgehensweise und Methodik.....	3
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>4</b>
2.1 Fahrerassistenzsysteme.....	4
2.1.1 Definition und geschichtliche Entwicklung .....	4
2.1.2 Einteilung von FAS.....	7
2.2 Kamerabasierte Fahrerassistenz .....	11
2.2.1 Einsatzmöglichkeiten.....	11
2.2.2 Umwelteinflüsse auf die Sensorik.....	19
2.3 Verschmutzungsmechanismen an Fahrzeugen .....	20
2.3.1 Arten der Verschmutzung.....	21
2.3.2 Strömungsmechanische Eigenschaften bei Verschmutzung .....	23
2.3.3 Methoden zur Sichtbarmachung und Messung von Verschmutzung ..	26
2.3.4 Einflussfaktoren.....	29
2.4 Bestehende Reinigungsvorschriften im Pkw .....	32
2.4.1 Scheinwerferreinigung.....	32
2.4.2 Scheibenreinigung.....	35
<b>3 Experimentelle Untersuchung .....</b>	<b>37</b>
3.1 Versuchsvorbereitung.....	37
3.1.1 Allgemeine Überlegungen .....	37
3.1.2 Versuchsobjekt.....	38
3.2 Versuchsdurchführung.....	46

---

3.3	Auswertung der Ergebnisse.....	56
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>60</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>62</b>
	<b>Anlagen .....</b>	<b>XI</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung.....</b>	<b>XII</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti-Blockier-System
ARM	Advanced RISC Machines
ASR	Antriebsschlupfregelung
AV Fahrzeug	Autonomous Vehicle (selbstfahrendes Fahrzeug)
CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CPU	Central Processing Unit
CUDA	Compute Unified Device Architecture
DiVeAn	Digitale Verschmutzungsanalyse
ECU	Electronic Control Unit (Steuergerät)
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FAS	Fahrerassistenz
FIR	Ferninfrarot
GFLOPS	Giga Floating Point Operations Per Second
GPU	Graphics Processing Unit (Grafikprozessor)
HFOV	Horizontal Field Of View (Horizontales Blickfeld)
HMI	Human Maschine Interface (Mensch-Maschinen Schnittstelle)
ISO	International Standards Organization
KI	Künstlicher Intelligenz
MW	Messwert
NCAP	New Car Assessment Programme

ODD	Operational Design Domain (Betriebsbereich)
OS	Operating System (Betriebssystem)
Pkw	Personenkraftwagen
RISC	Reduced Instruction Set Computer (Computerprozessor mit reduziertem Befehlssatz)
ROS	Robot Operating System (Betriebssystem des Roboters)
SAE	Society of Automotive Engineering (Berufsverband für Ingenieure in der Automobilindustrie)
SDK	Software Development Kit (Software-Entwicklungsumgebung)
SDS	Self Driving System (Sensorverbund des autonomen Systems)
SoC	System-on-a-Chip (Integrierter Schaltkreis)
VFOV	Vertikal Field Of View (Vertikales Blickfeld)
VGA	Video Graffics Array (Standard zur Videosignal Übertragung)

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A	m <sup>2</sup>	Fläche
$\overline{CF}$	-	Contamination Factor
FW	-	Filterwert
l	m	charakteristische Länge
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
R	mm/h	Niederschlagsintensität
R	J/kgK	Gaskonstante
Re	-	Reynoldszahl
T	°C	Temperatur
t	s	Zeit
u	m/s	Strömungsgeschwindigkeit des Mediums
v	m/s	Geschwindigkeit
VG	%	Verschmutzungsgrad
We	-	Weber-Zahl
p	Pa	Druck
$\Delta p$	Pa	Druckunterschied
Q	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom
$\sigma_L$	kg/s <sup>2</sup>	Oberflächenspannung des Fluids
$\rho_L$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte des Fluids
$\nu_L$	m <sup>2</sup> /s	(Nü) Kinematische Viskosität des Fluids

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil von FAS in Neuwagen in Deutschland, 2019 .....	5
Abbildung 2: Historische Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen .....	6
Abbildung 3: Unfälle motorisierter Fahrzeuge seit 1953.....	6
Abbildung 4: a: Darstellung des vertikalen Öffnungswinkels (Elevationswinkel), b: Darstellung des horizontalen Öffnungswinkels (Azimutwinkel) einer Frontkamera.....	12
Abbildung 5: allgemeines Funktionsprinzip einer Kamera.....	13
Abbildung 6: beispielhafte Darstellung einer Multi Purpose Front Kamera .....	13
Abbildung 7: exemplarisches Detektionsergebnis einer Spurmarkierung .....	15
Abbildung 8: Gliederung der Einsatzgebiete nach Kosten und Performance .....	16
Abbildung 9: Funktionsbeispiel eines kamerabasierten Assistenzsystems .....	17
Abbildung 10: Beispiel einer Rückfahrkamera mit zusätzlichen Hilfslinien und Abstandsangaben.....	17
Abbildung 11: Erscheinungsbild NIR System.....	19
Abbildung 12: Erscheinungsbild FIR System .....	19
Abbildung 13: Im Hinblick auf die Kfz-Verunreinigung kritische Bereiche.....	21
Abbildung 14: Quellen der Fahrzeugverschmutzung .....	23
Abbildung 15: die Mechanismen des Aufbrechens eines Tropfens in freier Strömung dargestellt. a) Blasenzerfall, b) Keulenzzerfall, c) Scheibenzerfall .....	24
Abbildung 16: Aufprallmechanismen von Tropfen auf Oberflächen; a) Haftung, b) Reflexion, c) Koaleszenz, d) Destruktion .....	26
Abbildung 17: Verschmutzungsanalyse mittels Fluoreszenzmethode von Seitenscheibe und Spiegelglas. Oben: Prototyp ohne Maßnahmen. Unten: Prototyp mit optimiertem Zustand. ....	27
Abbildung 18: Vergleich zwischen Fluoreszenz Methode (links) und DiVeAn® Methode inkl. Darstellung einer Farbskala (rechts).....	29
Abbildung 19: Kontaktwinkel Darstellung zwischen hydrophober und hydrophiler Beschichtung.....	30
Abbildung 20: Vergleich des Fließverhaltens von Wasser auf unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten. Links: Unbehandelt, Mitte: gewaschen, Rechts: gewaschen und poliert.....	30
Abbildung 21: Tropfendurchmesser in Abhängigkeit der Regenintensität mittels Wahrscheinlichkeitsdichte .....	31
Abbildung 22: Funktionsprinzip einer Scheinwerfer Reinigungsanlage .....	33



---

Abbildung 23: Darstellung des Einflusses der Verschmutzung auf die Leuchtstärke von Scheinwerfern. Links: verschmutzter Zustand. Rechts: mit Scheinwerferreinigung gereinigter Scheinwerfer .....	34
Abbildung 24: Schmutzsensoren in Scheinwerfern, 1) Streuscheibe, 2) Schmutzpartikel, 3) Sensorelement, 4) Sender, 5) Empfänger .....	34
Abbildung 25: Darstellung der Frontscheiben Sichtbereiche vom Pkw-Linkslenker; oben: Sichtbereich A, unten: reduzierter Sichtbereich B .....	36
Abbildung 26: Waveshare Jetbot Bausatz .....	40
Abbildung 27: Jetbot im montierten Zustand .....	41
Abbildung 28: Kontrolloberfläche des Jetbot über W-LAN mittels Jupyter Lab .....	41
Abbildung 29: Jetbot mit montiertem Acrylwinkel vor der Kamera .....	42
Abbildung 30: Oberfläche zur Datensammlung von Objekten am Jetbot .....	43
Abbildung 31: Beispielbilder aus dem Trainingsset des Jetbot .....	44
Abbildung 32: Ausgabe der Wahrscheinlichkeit einer bevorstehenden Blockade des Jetbot .....	45
Abbildung 33: zerstäubende Wasseraufbringung auf Prüfoberfläche .....	46
Abbildung 34: Aufbringung des Prüfstaubes .....	47
Abbildung 35: 150 µm Prüfsieb zum gleichmäßigen Aufklopfen von Prüfstaub .....	48
Abbildung 36: Vergleich aller Verschmutzungsklassen in aufsteigender Reihenfolge. links: Klasse 0, rechts: Klasse 5 .....	48
Abbildung 37: Messpunkte für die Lichtdurchlässigkeit an der Acrylplatte. Links: Skizze, Rechts: reales Versuchsobjekt .....	49
Abbildung 38: grafische Darstellung der erzeugten Verschmutzungsklassen .....	50
Abbildung 39: Testparcours Layout .....	51
Abbildung 40: Layout der Betrachtung zur Kollisionswahrscheinlichkeit des Referenzobjektes .....	52
Abbildung 41: Kamerabilder mit Verschmutzungsklasse 0 mit und ohne Referenzobjekt, sowie Blockadewahrscheinlichkeit .....	52
Abbildung 42: Kamerabilder mit Verschmutzungsklasse 1 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit .....	53
Abbildung 43: Kamerabilder mit Verschmutzungsklasse 2 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit .....	54
Abbildung 44: Kamerabilder mit Verschmutzungsklasse 3 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit .....	54

---

Abbildung 45: Kamerabilder mit Verschmutzungsstufe 4 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit.....	55
Abbildung 46: Kamerabilder mit Verschmutzungsstufe 5 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit.....	56
Abbildung 47: Zusammensetzung Sensor Prüfstaub KSL 570.....	XI

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Zu 90 bis 99% nehmen Autofahrer visuell die für das Führen des Fahrzeugs erforderlichen Informationen wahr. [1] Studien zeigen, dass bei schlechtem Wetter Autofahrer aufgrund von Sichtbehinderung Schwierigkeiten bei der Fahrzeuglenkung haben. Laut der Federal Highway Administration sind knapp 21% aller Unfälle in den Jahren 2007-2016 in den USA auf schlechte Wetterverhältnisse zurückzuführen. Dies beinhaltet alle registrierten Unfälle von Sachschäden bis hin zu Todesfällen. [2]

Theoretisch betrachtet ist ein Unfall umso wahrscheinlicher, wenn die aktuell vorherrschende Verkehrssituation, die Leistung des Fahrers übersteigt. Ziel von modernen Fahrerassistenzsystemen (FAS) ist es daher, die Diskrepanz zwischen der Fahrfähigkeit und der Anforderung der vorherrschenden Verkehrssituation auszugleichen oder die Fahraufgabe komplett zu übernehmen. [8] Um die Zahl der Unfälle im Straßenverkehr zu reduzieren ist nicht nur die Wissenschaft, sondern auch Hersteller, Verbraucherschutzorganisationen und der Gesetzgeber aktiv. Aktuell verkaufte Fahrzeuge werden vom Hersteller und von unabhängigen Organisationen auf ihre Sicherheit überprüft und bewertet. Eine positive sicherheitstechnische Bewertung eines Fahrzeugmodell erhöht dabei deutlich das Kaufinteresse beim Endkunden. Zur Erreichung einer positiven Bewertung sind die FAS in verschiedenen Ausführungen unverzichtbar geworden. [19] FAS unterstützen den Fahrer dabei, empfindliche und kritische Teilaufgaben der Fahraufgabe eigenständig zu erledigen und so das Fehlerpotenzial zu reduzieren. Allgemein hat ein solches FAS als Ziel die Deckung eines Assistenzbedarfs beim Fahrer. Sei es durch Erhöhung des Komforts, Stabilisierung des Fahrzeugs oder Vermeidung von Unfällen sowie deren Reduktion. Der Maßstab für erfolgreiche Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen bleibt die signifikante Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr. Bisherige Erkenntnisse zeigen, dass FAS bereits zu einem signifikant erhöhtem Sicherheitsniveau beigetragen haben [14]. Auch die Gesetzgebung hat dies bereits realisiert und umgesetzt. Die EU-Verordnung Nr. 2019/2144 enthält Vorgaben zur Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen. Diese umfasst unter anderem eine Mindestausstattung an FAS. Die ersten Regelungen bezüglich neuer Pkw Fahrzeugtypen traten im Juli 2022 in Kraft. Als Mindestausstattung werden Notbremsassistenten, Spurhalteassistenten sowie Geschwindigkeitsassistenten vorgeschrieben. Ziel ist eine weitere Senkung der Anzahl von getöteten oder verletzten Personen im Straßenverkehr. [3] Die Prüfung dieser Systeme ist unter anderem in der EU-Verordnung R79, Nr. 318/49 geregelt. Gemäß dieser Verordnung ist die Prüfung der Sensorblindheit wie folgt durchzuführen: „Mit Hilfe von zwischen dem

Fahrzeughersteller und dem technischen Dienst vereinbarten Mitteln, die im Prüfbericht zu vermerken sind, wird Blindheit des oder der Sensor(en) hergestellt.“ Eine nähere Beschreibung zur Definition wie dieser Blindheitsauftrag zu erfolgen hat, ist nicht vorgegeben. [4]

Für die Wahrnehmung der Umgebung sorgen bei all diesen modernen FAS, bis hin zu vollautonomen Fahrzeugen (AVs), verschiedene Arten von Sensoren (Kameras, Radare, Ultraschallsensoren, Laserscanner). [5] Qualität, Umfang und Beeinflussung dieses Signals sind wesentliche Bestimmungsfaktoren des Funktionsumfangs eines solchen Systems. [14] Auch wenn diese sich durch ihre Funktionsprinzipien und physikalischen Wirkweisen unterscheiden, besteht eine Gemeinsamkeit bei der Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen. Diesen Sensoren ist es bei einer Verschmutzung oder Verdeckung nicht oder nur teilweise möglich, Objekte, Fahrspuren, Fußgänger oder Hindernisse zu erkennen. Wasser, Salz, Schnee, Eis, Sonnenstrahlen, Insekten und Öl sind nur einige Beispiele dafür, was Sensoren im täglichen Betrieb einschränken könnten. [5]

Um den Einfluss solcher Umwelteinflüsse zu reduzieren und Sensoren und deren Erkennung robuster zu gestalten, können beispielsweise verbaute Reinigungssysteme unterstützen. Bei Betrachtung der Menge der verbauten Sensoren im Pkw (Personenkraftwagen) stellt dies eine große technische Herausforderung dar. Die steigende Anzahl an Sensoren, deren Performance durch eine Reinigung begünstigt wird, bringt auch einen erhöhten Energie- und Reinigungsmittelbedarf, sowie größere Hürden bei der Sensorintegration mit sich. In der Ausbaustufe des vollautomatisierten Fahrens, werden je nach Hersteller zwischen 28 [6] und 40 [7] Sensoren eingesetzt. Solche Reinigungssysteme sind allerdings noch nicht verpflichtend vorgeschrieben.

## 1.2 Aufgabenstellung

In der Literaturrecherche hat sich gezeigt, dass kein standardisiertes Verfahren existiert, um Erkennungsleistungen oder gesamte Fahrfunktionen gegenüber Verschmutzungs- und anderen Umwelteinflüssen zu prüfen und zu bewerten. In Anbetracht der Tatsache, dass Fahrzeuge in Zukunft auch ohne Fahrer unterwegs sind und man sich somit auf die Erkennungsleistung der Sensorik verlassen muss, sind geeignete standardisierte Prüfungen gegen Umwelteinflüsse notwendig. Diese Überlegung hat zur Problemstellung dieser Arbeit geführt. Ziel ist die Erstellung einer Methodik zur experimentellen Abbildung realistischer und einfach zu reproduzierender Verschmutzungsbedingungen an Fahrzeugen und Sensoren, sowie die Auswertung des Effektes dieser Bedingungen. Es soll somit möglich sein, die Erkennungsleistung gegenüber der Verschmutzungsbelastung prüfen zu können. Hierzu müssen auch geeignete Verschmutzungsmethoden entwickelt werden.

Zusätzlich soll diese in einem experimentellen Modellversuch angewandt werden. Diese generierte Methodik soll sich dabei speziell auf kamerabasierte Systeme fokussieren. Die zu erarbeitende Methodik soll auf jede Art von kamerabasiertem Fahrassistenzsystem angewendet werden können. Dadurch sollen einfach und reproduzierbar Systemgrenzen der Sensorik festgestellt und abhängig davon Freigaben zur Verschmutzungsresistenz gegeben werden können. So soll sichergestellt werden, dass kamerabasierte FAS Systeme im Alltag bestehen und sicher betrieben werden können.

### **1.3 Vorgehensweise und Methodik**

Die Arbeit teilt sich in einen theoretischen Teil und einen Versuchsteil auf. Der theoretische Teil dient als Grundlagenschaffung des Verständnisses und zeigt den aktuellen Stand der Technik auf. Es wird herausgearbeitet, was Fahrassistenzsysteme und insbesondere kamerabasierte Fahrassistenzsysteme sind und wie sie funktionieren. Hierbei wird aufgezeigt wofür diese aktuell angewendet werden und worin sich die Schwierigkeiten im täglichen Betrieb befinden. Insbesondere wird darauf eingegangen, wie Verschmutzungsmechanismen am Pkw funktionieren und welche Arten von Schmutz vorliegen. Die gesonderte Betrachtung wie Schmutz Kamerasysteme sowie deren Einsatz beeinflusst, steht dabei im Vordergrund. Auch werden bestehende Verschmutzungsnormen und Reinigungsvorschriften betrachtet, die aktuell am Pkw vorzufinden sind. Zudem werden alternative Bewertungsmethoden zur Verschmutzungsmessung vorgestellt und beschrieben. Die Theorie bildet die Basis, zur Erstellung der Verschmutzungsmethodik, welche in dieser Arbeit angewandt wird. Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit werden diverse Versuche in Bezug auf den Einfluss verschiedener Verschmutzungstypen auf Kamerasystemen durchgeführt. Hierbei soll der Einfluss des Verschmutzungsgrades auf das Auftreten von Systemgrenzen festgestellt werden. Dazu wird der Modellaufbau eines kamerabasierten selbstfahrenden Fahrzeugs dargestellt. Nach Vorstellung und Beschreibung der technischen Daten und der Funktionsweise des Roboters, soll dieser mithilfe von Künstlicher Intelligenz (KI) trainiert werden autonom zu fahren und in einem aufgebauten Parcours, Hindernissen auszuweichen. Im Anschluss der Fahrversuche werden die Resultate dokumentiert und ausgewertet. Auf Basis der Ergebnisse aus den Versuchen wird ein Lösungsansatz zur Messbarkeit des Einflusses von Verschmutzung auf kamerabasierte FAS herausgearbeitet und beschrieben.

## 2 Stand der Technik

Im nachfolgenden Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik zu Fahrassistenz herausgearbeitet. Hierbei wird insbesondere die kamerabasiert Fahrassistenz erläutert. Zudem werden Verschmutzungsmechanismen im Automobilbereich erläutert. Als letzter theoretischer Teil werden die aktuell vorliegenden standardisierte Reinigungssysteme am Pkw dargestellt und beschrieben. Hierbei werden die Definitionen, die in der Fachliteratur verwendet und etabliert sind herangezogen, sowie die charakteristischen Parameter vorgestellt und erläutert.

### 2.1 Fahrerassistenzsysteme

#### 2.1.1 Definition und geschichtliche Entwicklung

Der Begriff „Assistenzsystem“ soll den Anforderungen und Rahmenbedingungen von technischen Systemen gerecht werden. Er leitet sich vom lateinischen „assistere“ ab, was „jemandem helfen“ oder „jemandem nach seinen Anweisungen helfen“ bedeutet. Assistenzsysteme sollen den Fahrer auf Wunsch bei der Fahrzeugbedienung unterstützen, indem sie ihm Informationen zur Verfügung stellen (Informationssysteme) oder ihn von Teilaufgaben entlasten (Komfortsysteme). Einige Assistenzsysteme können auch eingreifen, um den Fahrer in Notsituationen bei der Umsetzung seines Wunsches nach sicherem Fahrverhalten zu unterstützen. Damit können diese technischen Systeme zur Erhöhung des Komforts und der Sicherheit beitragen [8]

Reif definiert das Wort FAS wie folgt: "Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer bei seiner primären Fahraufgabe. Sie informieren und warnen ihn, erhöhen seinen Komfort und die Sicherheit, indem sie ihn aktiv bei seiner Fahrzeugführung und Fahrzeugstabilisierung unterstützen. Falls nötig, verringern sie seine Arbeitsbelastung." [9]

Um ein Fahrzeug bei extremen Manövern, wie starke Brems-, Antriebs- und Lenkvorgängen, weiterhin kontrollieren zu können wurden Systeme wie ABS, Antriebsschlupfregelung (ASR) und Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) entwickelt. Diese Systeme stellen weniger Fahrerassistenzsysteme (FAS) dar, sondern sind eher Fahrzeugassistenzsysteme. Sie unterstützen das Fahrzeug dabei kontrollierbar zu bleiben. Eine Unterstützung des Fahrers zur richtigen Dosierung und Koordinierung für Lenk-, Vortriebs-, und Bremsvorgaben stellen hingegen FAS dar. [15]

Durch die rasante technologische Entwicklung in den zentralen Bereichen Sensorik, Aktuator und Algorithmik nimmt der Automatisierungsgrad der Fahrerassistenzsysteme mit der Entwicklung neuer Assistenzsysteme, wie beispielsweise der Spurhaltung oder der Verkehrszeichenerkennung erheblich zu. [10] Dies zeigt vor allem der wachsende Anteil solcher Systeme in Neuwagen. Der Anteil diverser FAS im Jahr 2019 ist in Abbildung 1 dargestellt. Spurhalteassistenten sind mittlerweile in fast 50% der Pkw Neuwagen verbaut. [11]

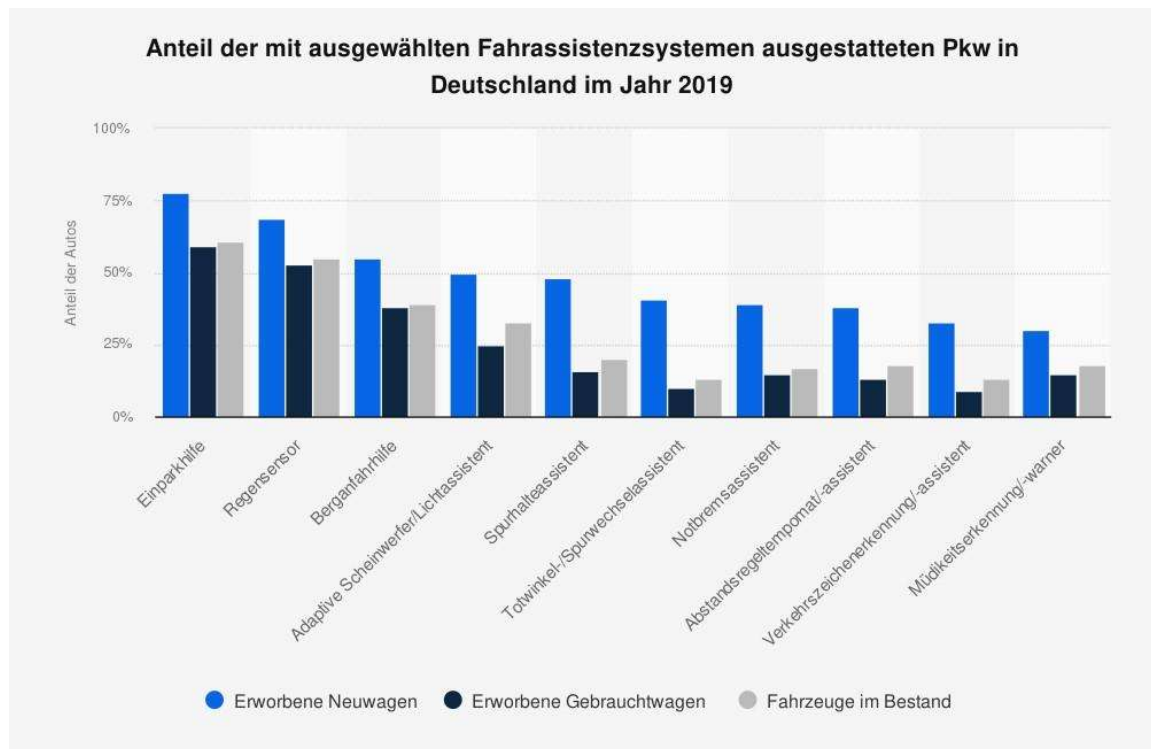


Abbildung 1: Anteil von FAS in Neuwagen in Deutschland, 2019. [11]

Bei Betrachtung der Entwicklung der zukünftigen Trends solcher FAS im Pkw, lässt sich neben der steigenden Anzahl verwendeter Sensorik Systeme, auch der Trend hin zu immer mehr Konnektivität im Straßenverkehr erkennen. Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist. Einer der Hauptgründe für die rasante Entwicklung ist der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) und maschinellem Lernen. Diese Schlüsseltechnologie beflügelt die Entwicklung neuer Algorithmen zusätzlich. [10]

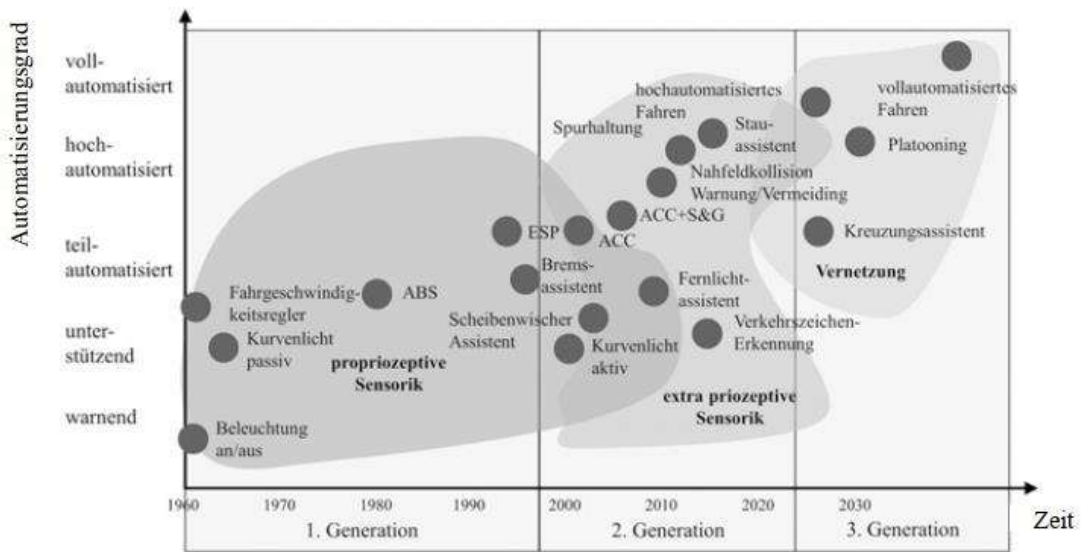


Abbildung 2: Historische Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen [10]

Aus einer Studie von Brown geht hervor, dass menschliches Versagen für 95% aller Straßenverkehrsunfälle verantwortlich ist. [12] Nach Angaben des Bundesamtes für Statistik ist in 88% der Verkehrsunfälle menschliches Versagen die Ursache. [13]

Durch den Einsatz von ESP und Notbremsassistenten konnten die Anzahl tödlicher Unfälle weiter reduziert werden. [14] In Abbildung 3 ist die Entwicklung von tödlichen Unfällen in Deutschland pro eintausend Einwohnern dargestellt. Daraus geht hervor, dass als Reaktion auf die Einführung neuer FAS Systeme eine Reduzierung der Unfallzahlen mit fatalem Ausgang erreicht werden konnte. Besonders hervorzuheben ist die deutliche Reduktion nach Einführung des Notbremsassistenten im Jahr 2002.

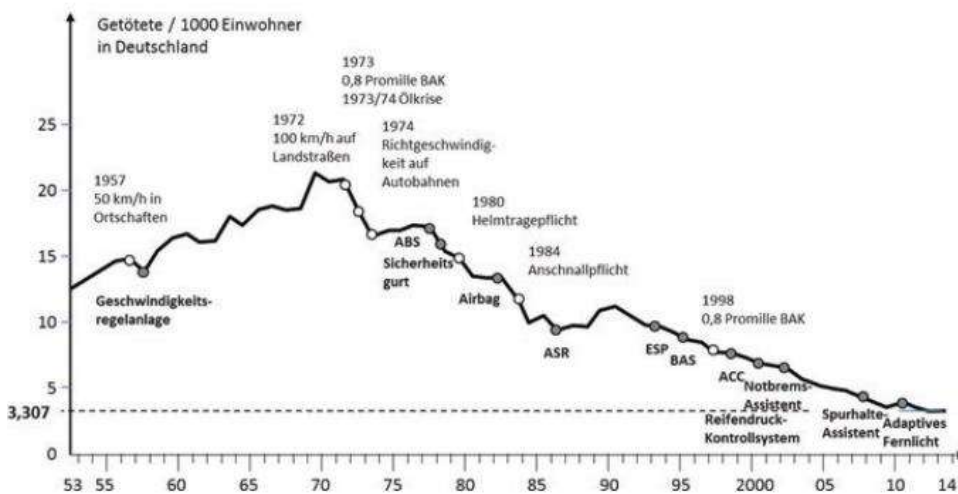


Abbildung 3: Unfälle motorisierter Fahrzeuge seit 1953 [14]



## 2.1.2 Einteilung von FAS

FAS lassen sich in die nachfolgenden drei Kategorien einteilen. Diese sind in Tabelle 1 nochmals anschaulich zusammengefasst.

a. Kategorie A: Informierende Funktion

Informationsfunktionen ermöglichen es dem Fahrer, die für den Betrieb des Fahrzeugs erforderlichen Informationen abzurufen. Diese Informationen können z. B. über die Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) bereitgestellt werden.

b. Kategorie B: Kontinuierlich wirkende automatisierte Funktionen

Diese Funktionen können über längere Zeiträume oder Fahrtabschnitte wirken. Sowohl der Systemzustand als auch Eingriffe in die Fahrzeugführung werden dem Fahrer über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) zur Verfügung gestellt, um das Zusammenspiel zu verbessern. Der Fahrer kann die Fahrzeugführung und jede Veränderung der Fahrzeugführung unmittelbar wahrnehmen, z. B. über eine Rückmeldung der Bedienelemente am Lenkrad oder über die für den Fahrer spürbare Fahrdynamik. Zudem enthält diese Kategorie die Stufen der verschiedenen Automatisierungsgrade.

c. Kategorie C: Eingreifende Notfallsysteme

Eingreifende Notfallsysteme treten dann in Aktion, wenn ein Notfall plötzlich eintritt und ohne Interaktion unmittelbar gefährlich wird. Die Aktivierung dieser Systeme wird vollautomatisch gesteuert. Ein häufiges Beispiel sind automatische Notbremsysteme. Es gibt jedoch auch Systeme, die eine Notbremsung durchführen, wenn sich herausstellt, dass der Fahrer dazu nicht mehr in der Lage ist (Nothalt). [15]

*Tabelle 1: Einteilung der Fahrerassistenz nach deren Wirkungsweise [15]*

Kategorie		
A	B	C
Informierende und warnende Funktionen	Kontinuierlich automatisierte Funktionen	Eingreifende (Notfall-) Funktionen

---

Zudem können FAS auch nach dem Grad der Automatisierung eingeteilt werden. Der Automatisierungsgrad von Fahrfunktionen wird gemäß dem SAE-System (Society of Automotive Engineers) vereinfacht in sechs Stufen unterteilt. Jede Stufe stellt dabei eine zunehmende Automatisierung des Fahrvorgangs dar. Die einzelnen Stufen werden in Tabelle 2 aufgeführt und beschrieben. Durch die SAE-Stufen lässt sich einfach eine Einschätzung über die Entwicklung des autonomen Fahrens sowie einen Überblick über das komplexe Thema gewinnen. In der Praxis können Überschneidungen der einzelnen Stufen auftreten. [16]

Um die jeweiligen Funktionen darstellen zu können ist die Auswahl der Sensorik entscheidend. Die Auswahl des Sensorelements für ein Fahrerassistenzsystem ist in vielen Bereichen jedoch nicht von der Funktion abhängig. Die Bedingungen basieren auf den weltweit in der Automobilindustrie durch den Verband der Automobilindustrie oder ISO (International Standards Organization) eingeführten Standards und den Regeln, die sich die Systemlieferanten und Automobilhersteller selbst auferlegen. Für den Auswahlprozess müssen die unterschiedlichen Sensoranforderungen für jeden Lieferanten systematisch in einer Matrix zusammengefasst werden. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Angebote stark vereinfacht. Unter anderem spielen die allgemeinen Auswahlkriterien sowie die technischen Daten, um die gesuchte Funktion darzustellen, die Hauptrolle in diesem Prozess. [8]

Tabelle 2: Einteilung der Automatisierungsebenen nach SAE J3016 [16]

Stufe	Name	Beschreibung
0	No Driving Automation Keine Automation	Keinerlei Unterstützung des Fahrers.
1	Driver Assistance Fahrer Assistenzsystem	Unterstützung des Fahrers bei Längs- oder Querführung.
2	Partial Driving Automation Teilautomatisiertes Fahren	Sowohl bei der Längs- als auch bei der Querbewegung unterstützen verschiedene Assistenzsysteme den Fahrer.
3	Conditional Driving Automation Bedingtautomatisiertes Fahren	Die Fahraufgabe wird für bestimmte Anwendungsfälle vollständig von Assistenzsystemen übernommen.  Die Übernahme der vollständigen Fahraufgabe durch den Fahrer muss jederzeit auf Anforderung möglich sein (bei Ausfall des Systems oder Erreichen der Systemgrenzen).
4	High Driving Automation Hochautomatisiertes Fahren	Die Fahraufgabe wird für bestimmte Anwendungsfälle in vollem Umfang durch das System übernommen. Die Fahraufgabe verbleibt beim System, welches auch bei Systemfehlern oder beim Erreichen von Systemgrenzen einen sicheren Zustand herstellt.
5	Full Driving Automation Vollautomatisiertes Fahren	Das System übernimmt für alle Anwendungsfälle die vollständige Fahraufgabe unter allen Umgebungs- und Fahrbahnbedingungen. Die Fahraufgabe verbleibt beim System, welches auch bei Systemfehlern oder bei Erreichen der Systemgrenzen einen sicheren Zustand herstellt.



## 2.2 Kamerabasierte Fahrerassistenz

Die kamerabasierte Fahrerassistenz beschreibt eine Form der FAS, welche auf Basis von Kameras als Sensoriksystemen umgesetzt wird. In den folgenden Kapiteln werden die Definition, die Einsatzgebiete sowie die Funktion und Leistungsfähigkeit solcher Systeme näher erläutert. Eingegangen wird auch auf mögliche Einflüsse und Fehlverhalten auf Grund von Verschmutzung.

### 2.2.1 Einsatzmöglichkeiten

Zur Aufnahme von Verkehrsinformationen nutzen Autofahrer in hohem Maße ihre visuelle Wahrnehmung. Kein anderes Sensorprinzip verfügt über vergleichbare Wahrnehmungsfähigkeiten in Bezug auf die Vielfalt der erzielbaren Informationen. So können mit Kameras bewegte und unbewegte Objekte nahezu jeder Art erkannt, klassifiziert, vermessen und verfolgt werden. Zwei Beispiele für wichtige Informationen, die von keinem anderen Sensorprinzip wahrgenommen werden können, sind der Zustand von Ampeln oder die Markierung von Schildern und Fahrbahnen. Aus diesem Grund sind Kameras seit 1994 als Sensoren in Serienfahrzeugen im Einsatz und werden bei der weiter voranschreitenden Automatisierung von Fahrzeugen immer wichtiger. [18] Zusätzlich zu klassischen Kameras, die den Bereich des sichtbaren Lichtes abdecken können, sind auch Systeme aus dem Infrarotbereich nutzbar, wodurch sich zusätzliche Nachtsicht-Funktionen realisieren lassen. [15]

Der Einsatz von Kamerasystemen als Rückfahrkameras ist eines der ersten Fahrerassistenzsysteme. Dabei wird der Fahrer durch die Darstellung von Echtzeitvideos auf dem Anzeigesystem unterstützt. Erweiterte Funktionen durch maschinelle Bildverarbeitung sind z. B. der automatische Fernlichtfunktion, Spurhalteassistenten sowie Geschwindigkeitsassistenten. Bei diesen Systemen wird das Videobild dem Fahrer nicht mehr angezeigt, sondern die Funktion direkt aus dem Kamerabild abgeleitet. Darüber hinaus wird die Kamera auch im Fahrzeuginneren mit zwei wichtigen Funktionen eingesetzt: Erstens die Überwachung des Fahrers, um seinen Zustand und seine Absichten zu erkennen, und zweitens die Überwachung der Nutzung des Fahrzeugs. Hierbei wird das Kamerasystem Teil einer erweiterten Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Steuerung von Funktionen, z.B. durch Gesten- und Blicksteuerung. [15]

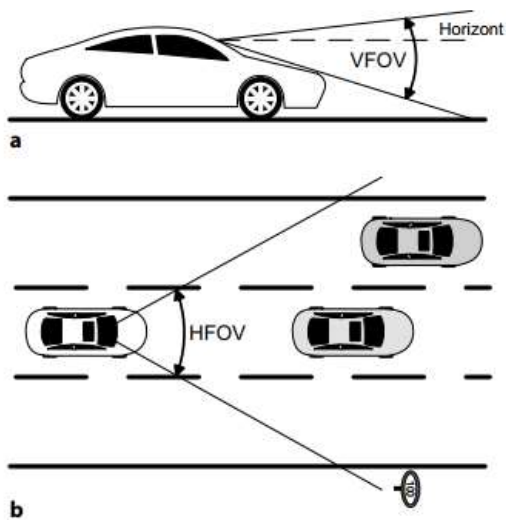


Abbildung 4: a: Darstellung des vertikalen Öffnungswinkels (Elevationswinkel), b: Darstellung des horizontalen Öffnungswinkels (Azimutwinkel) einer Frontkamera [15]

Diese große Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten ist auf die vielfältige Gestaltungsfreiheit der Kameras zurückzuführen. Die wichtigsten Stellschrauben sind der Azimut- und der Elevationswinkel. Bei Kameras, die im Frontbereich von Fahrzeugen verbaut sind, spielt der horizontale Öffnungswinkel (HFOV) meist die wichtigste Rolle. Das vertikale Sichtfeld (VFOV) wird im Wesentlichen durch die Montagehöhe und die minimale Erkennungsweite im Nahbereich bestimmt, siehe hierzu Abbildung 4. Der Kompromiss zwischen hoher Auflösung und großem Erfassungswinkel lässt sich beispielsweise leicht mit einem Weitwinkelobjektiv eingehen. Für Assistenzfunktionen mit hoher lateraler Genauigkeit spielen Kameras daher eine wichtige Rolle. Die Darstellung in einem zweidimensionalen Bild entzieht der dreidimensionalen Welt jedoch eine ganze Dimension. Dies wirkt sich vor allem auf die Entfernungsinformation der einzelnen Pixel aus. Dies betrifft den Bereich des maschinellen Sehens bis hin zur künstlichen Intelligenz in der Videosignalanalyse. Durch die Nutzung des Kontextes kann dieser Verlust zumindest teilweise kompensiert werden. Für den Einsatz von Kameras in der Fahrzeugautomatisierung sind daher ausgefeilte Methoden aus dem Bereich des maschinellen Sehens bis hin zur künstlichen Intelligenz bei der Analyse von Videosignalen erforderlich. Ein allgemeines Schema einer Kameraarchitektur ist in Abbildung 5 dargestellt. [18]

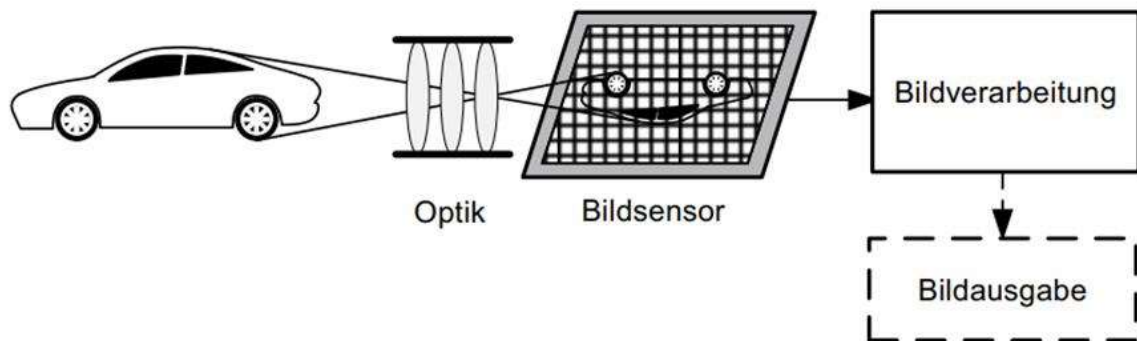


Abbildung 5: allgemeines Funktionsprinzip einer Kamera [18]

Kameras, die im Automobilbereich eingesetzt werden, müssen besondere Anforderungen erfüllen und mit den unterschiedlichsten Einsatzbedingungen zurechtkommen. Die Helligkeit der Bildszenen kann im Automobilumfeld beispielsweise nicht gesteuert werden. Der Dynamikbereich um dies ausgleichen zu können, reicht bei herkömmlicher Bildsensoren (Charge Coupled Device - CCD) daher nicht aus. Es sind somit hochdynamische Bildsensoren erforderlich. Die Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) Technik, mit nichtlinearer Luminanzwandlung, deckt heute einen sehr großen Helligkeitsdynamikumfang (bis zu 150 dB) ab. Unter Luminanzkonversion oder Luminanzwandlung, versteht man den Prozess der Anpassung der Helligkeit in einem Bild, wodurch eine Verbesserung der visuellen Darstellung, oder eine Erhöhung der Genauigkeit des Bildverarbeitungsmechanismus erreicht werden kann. Daher ist diese Technologie den herkömmlichen CCD-Sensoren für klassische Automobilanwendungen überlegen. Hinzu kommt auch noch der deutlich geringe Stromverbrauch von CMOS Sensoren. Mittlerweile wurde diese Kameraart zu einer "Mehrzweckkamera" weiterentwickelt. Mit ihr lassen sich verschiedenste Funktionen, insbesondere bei Tages- und Nachtlicht, realisieren. Ein Beispiel einer solchen Kamera ist in der Abbildung 6 dargestellt. [19]



Abbildung 6: beispielhafte Darstellung einer Multi Purpose Front Kamera. [19]

Die Bildsensor-Steuergeräte benötigen in der Regel die größte Rechenleistung im gesamten Fahrzeug. Dabei laufen unterschiedliche Prozesse ab, um aus einem Kamerabild genaue Erkennungen extrahieren zu können. Eine typische Bildverarbeitungskette lässt sich in folgende Schritte unterteilen: [8]

- a. **Bildaufnahme:** Ablegen des Bildes im Speicher [18]
- b. **Bildvorverarbeitung:** Die Bildvorverarbeitung steht zwischen der Bildaufnahme und der resultierenden Bildverarbeitung. Ihre Aufgabe ist es im ersten Schritt, alle negativen Effekte wie Rauschen und Linsenverzerrungen zu beseitigen. Der zweite Schritt besteht darin, wichtige Informationen hervorzuheben und unwichtige oder störende Informationen zu entfernen. [8]
- c. **Merkmalsextraktion:** Dieser Schritt schließt sich an die Bildvorverarbeitung an. Ziel ist die Ableitung von Merkmalen aus dem Bild. Merkmale sind signifikante Bestandteile eines Bildes oder symbolische bzw. empirische Eigenschaften des Bildes bzw. des darin enthaltenen Objektes. Dabei werden Bildpunkte verschiedenen Merkmalen zugeordnet. Dadurch kann die zu verarbeitende Datenmenge erheblich reduziert werden. Die extrahierten Informationen werden mit Hilfe eines Merkmalsvektors hervorgehoben. Dieser Schritt wird auch als „Early-Vision“ bezeichnet. Beim menschlichen Sehen läuft ein vergleichbarer Prozess ab. Durch Rezeptorfelder in der Netzhaut werden beispielsweise Kanten oder auch bewegte Objekte priorisiert „erkannt“. Unterschieden werden zwei Gruppen von Merkmalen: Einzelbildmerkmale und Korrespondenzmerkmale. Einzelbildmerkmale lassen sich bereits aus dem Grauwertmuster eines Bildes ableiten, während Korrespondenzmerkmale zusammenhängende Merkmale über verschiedene Bilder hinweg markieren. [8]
- d. **Bildanalyse:** In diesem Schritt erfolgt die tatsächliche Extraktion von Objekten und Informationen aus dem Bild. Durch die mittlerweile verwendeten tiefen neuronalen Netze (künstliche Intelligenz) ist dieser Punkt nur bedingt trennbar. Vereinfacht vergibt ein solches Netz jedem einzelnen Pixel eine Objektklasse. Man spricht von „semantischen Labelings“. Durch Mustererkennung dieser Pixel lassen sich zum Beispiel Fußgänger, Fahrzeuge oder Spurmarkierungen erkennen. [18] Ein Beispiel eines Detektionsergebnis der Bildanalyse ist in Abbildung 7 dargestellt.

Einen erwähnenswerten Durchbruch machte die Bildverarbeitung 2012 mit dem Einsatz von Deep Learning Netzwerken, sogenannten Deep Convolutional Neural Networks. Hierbei werden Bilder durch in unterschiedlichen Schichten verarbeitet und Merkmale extrahiert. Eines der bekanntesten Deep Convolutional Neural Networks ist das AlexNet. Es ist



nach seinem Erfinder Alex Krizhevsky benannt und besteht aus insgesamt acht Schichten. Die ersten fünf Schichten werden als Convolutional-Layer bezeichnet, um Merkmale aus den Eingabedaten herauszufiltern. Die restlichen drei Schichten, werden Fully-Connected Layer genannt. Diese übernehmen die Klassifikation der extrahierten Merkmale. Durch diese Methodik war es erstmalig möglich über 1,2 Millionen hochauflösender Bilder in über 1.000 Klassen vollautomatisch und mit einer Genauigkeit von knapp 85 % einzuteilen. Es leitet damit einen Paradigmen-Wechsel in der Bildverarbeitung ein. [20]

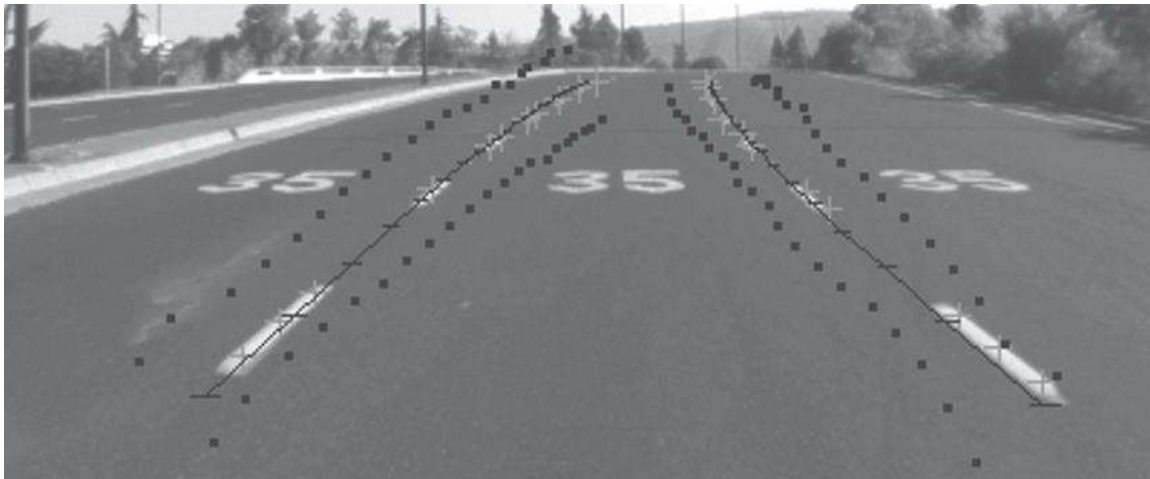


Abbildung 7: exemplarisches Detektionsergebnis einer Spurmarkierung [8]

### **Anwendungsbeispiele:**

Wie bereits erwähnt, spielen Kameras in den verschiedensten Bereichen des Automobils eine immer wichtigere Rolle. Bis vor wenigen Jahren war die Anzahl kamerabasierter Fahrerassistenzsysteme noch begrenzt und hauptsächlich auf das Premiumsegment ausgerichtet. Heute bieten die meisten Fahrzeughersteller ausgewählte Funktionen modellspezifisch auch in kleineren Fahrzeugklassen an. Auch in Zukunft wird das Premiumsegment eine wichtige Rolle bei der Entwicklung neuer und innovativer FAS hin zum hochautomatisierten Fahren spielen, aber gesetzliche Regelungen und ein verändertes Sicherheitsverständnis bei Kunden und Behörden haben zu einer neuen Marktsituation geführt. Als Beispiel kann das Bewertungsschema des europäischen Neuwagenbewertungsprogramms Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) dienen. In diesem Bewertungsschema werden Notbremsassistenten und Spurhalteassistenten in den Test- und Bewertungsprotokollen stärker berücksichtigt und entsprechende Wertungen vergeben. [15]

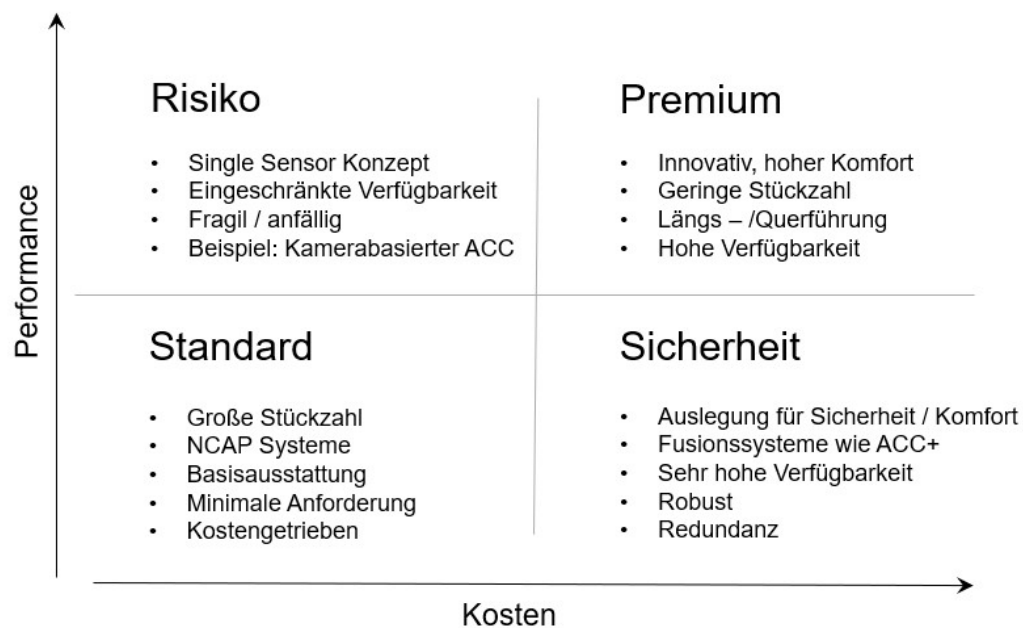


Abbildung 8: Gliederung der Einsatzgebiete nach Kosten und Performance [15]

Eine beispielhafte Strukturierung des kamerabasierten FAS-Marktes anhand der Indikatoren Kosten und Leistung ist in Abbildung 8 dargestellt. Es wird deutlich, dass neben der tatsächlichen Leistungsfähigkeit eines Systems auch dessen Einsetzbarkeit und Flexibilität eine wichtige Rolle spielen werden, um sich im Markt zu behaupten. Für die Realisierung von Funktionen wie z. B. Notbremsassistent, Geschwindigkeitsassistent oder Spurhalteassistent wird zwischen zwei Klassifizierungsklassen der Kamera unterschieden. Dies sind die Fahrspurerkennung und die Objekterkennung. [15]

Über einen Datenbus werden die extrahierten Bildmerkmale in Form von Objektlisten anderen Komponenten im Fahrzeug zur Verfügung gestellt. Im dargestellten Beispiel in Abbildung 9 wird die vom Bildprozessor erkannte und interpretierte Geschwindigkeitsbegrenzung an das Kombiinstrument übertragen. Dieses wird als Symbol im Grafikdisplay des HMI angezeigt. Wird das Tempolimit nicht eingehalten, warnt das System den Fahrer zusätzlich akustisch oder haptisch (z. B. durch erschwerte Betätigung des Gaspedals). [19]

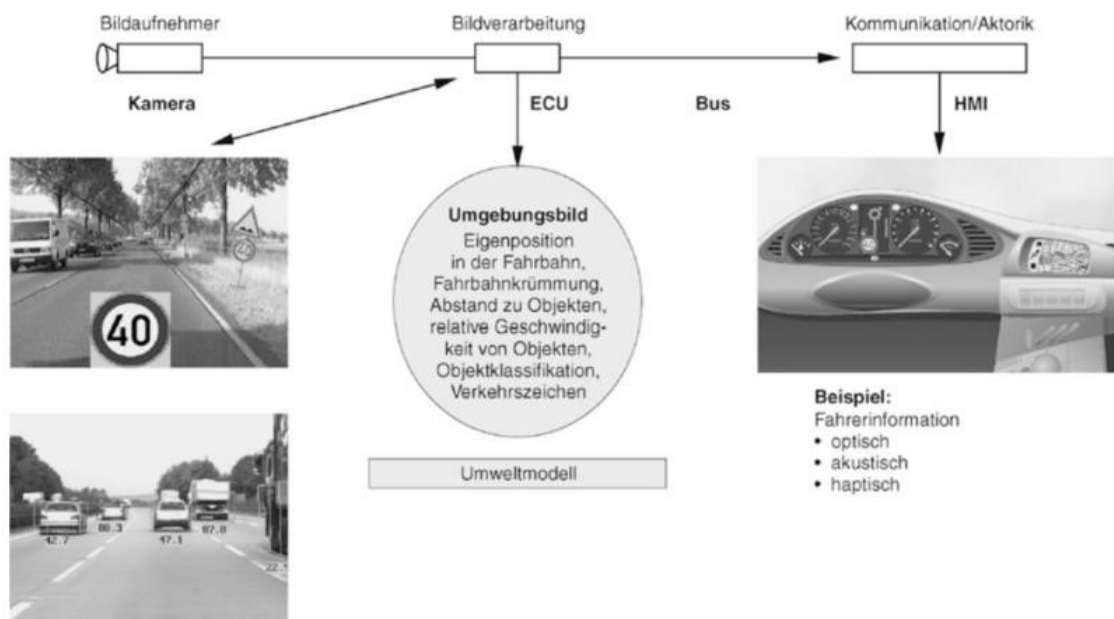


Abbildung 9: Funktionsbeispiel eines kamerabasierten Assistenzsystems [19]

Das Einsatzgebiet von Kameras beschränkt sich dabei nicht nur auf die Erfassung der Umgebung rund um das Fahrzeug. Auch im Fahrzeug werden solche Systeme immer häufiger eingesetzt. Dabei übernehmen sie unterschiedliche Aufgaben. So kann beispielsweise das Infotainment über Gestensteuerung bedient werden. Fahrerüberwachungskameras erkennen und verfolgen den Zustand des Fahrers und warnen bei Ablenkung oder Ermüdung. Eine weitere Gruppe von kamerabasierten Systemen, die im Pkw zum Einsatz kommen, sind die bildgebenden Videosysteme. Bei diesen Systemen werden dem Fahrer entzerrte Live-Bilder zur Verfügung gestellt. Bei den am weitesten verbreiteten Videosystemen handelt es sich um Rückfahr- und Rangierassistenzsysteme, die den Fahrer beim Einparken mit Zusatzinformationen, wie z. B. den Abständen zu Hindernissen unterstützen. Siehe hierzu Abbildung 10. [19]

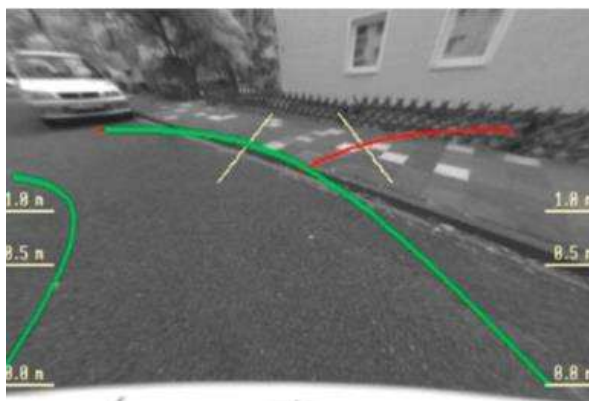


Abbildung 10: Beispiel einer Rückfahrkamera mit zusätzlichen Hilfslinien und Abstandsangaben [19]

Nachtsichtsysteme sind eine weitere Disziplin der bildgebenden Kamerasysteme. Ziel dieser Systeme ist die Bereitstellung eines klaren Bildes für den Fahrer in dunkler Umgebung und die Hervorhebung von Objekten, die für das menschliche Auge erst sehr spät oder gar nicht erkennbar sind. 50 % aller tödlichen Unfälle ereignen sich bei Nacht, obwohl nur etwa 20 % aller Fahrten bei Nacht stattfinden. Der Sicherheitsgewinn durch solche Systeme ist also sehr hoch. Man unterscheidet prinzipiell zwischen den zwei Verfahren Ferninfrarot und Nahinfrarot. [19] Diese werden nachfolgend erläutert.

### **Nahinfrarot (NIR):**

Bei Infrarotsystemen wird Infrarotstrahlung im nahen Spektralbereich zwischen 800 und 1000 nm, nahe dem sichtbaren Spektrum, verwendet. Da Objekte in diesem Wellenlängenbereich keine Eigenstrahlung aussenden, müssen sie mit speziellen Scheinwerfern aktiv angestrahlt werden. Nur so ist es möglich, sie mit einer infrarotempfindlichen Videokamera aufzunehmen. In der Praxis werden zusätzliche Infrarot-Lichtmodule in die Frontscheinwerfer integriert, um das NIR-System zu realisieren. Aufgrund der Nähe des NIR-Spektrums zum sichtbaren Spektrum reflektieren natürliche Objekte das NIR-Licht in ähnlicher Weise wie das sichtbare Licht, was bedeutet, dass das Bild bei Fernlicht in hohem Maße dem normalen visuellen Eindruck ähnelt und dem Fahrer vertraut erscheint. In qualitativ hochwertigen Systemen wird das Videobild nachbearbeitet, um ein kontrastreiches, brillantes Bild zu erhalten und Objekte gut erkennbar zu machen. Damit kann der Fahrer Fußgänger bis zu einer Entfernung von 150 Metern sicher erkennen, siehe hierzu Abbildung 11. [19]

### **Ferninfrarot (FIR):**

Die von Objekten abgegebene Wärmestrahlung im infraroten Wellenlängenbereich von 7 bis 12  $\mu\text{m}$  wird von FIR-Nachtsichtverbesserungssystemen empfangen. Da jedes Objekt in der Umgebung aktiv Wärmestrahlung abgibt, können diese System passiv agieren und benötigen keine zusätzlichen Strahlungsquellen zur Beleuchtung der Umgebung. Zur Aufnahme des Wärmebildes wird eine spezielle Kamera benutzt, die nur im oben genannten Wellenlängenbereich empfindlich ist. Diese Kameras nennt man pyroelektrische Wärmebildkamera oder die Mikrobolometerkamera. Wichtig hierbei ist eine gut justierte Temperaturregelung. Da das Glas der Windschutzscheibe für diese Wellenlängen nicht durchlässig ist, muss die Kamera außerhalb des Fahrzeugs angebracht werden. Aktuelle Kameras haben eine Auflösung von Video Graphics Array (VGA) (640 x 480 Pixel). Die Bilder werden über die electronic control unit (ECU) an das HMI gesendet und für den Fahrer abgebildet. Dabei werden warme Objekte heller dargestellt als Kalte. Nachteilig ist jedoch das Verschwinden des Kontrasts bei sehr hohen Außentemperaturen. Der

Kontrast ist dann kaum noch erkennbar. Zudem ist das angezeigte Bild für den Fahrer meist gewöhnungsbedürftig, siehe hierzu Abbildung 12. [19]



Abbildung 11: Erscheinungsbild NIR System [19]



Abbildung 12: Erscheinungsbild FIR System [19]

## 2.2.2 Umwelteinflüsse auf die Sensorik

Als Umwelteinflüsse werden prinzipiell alle Arten von physikalischen, chemischen oder sonstigen Einflüssen auf ein Objekt bezeichnet. Sie stammen in der Regel aus der direkten und indirekten Umgebung während des Herstellungs-, Transport- und Gebrauchsprozesses. Ob die einwirkenden Umwelteinflüsse natürlichen oder technischen Ursprungs sind, wie z.B. Regen oder Vibrationen und Kratzspuren, spielt aus der Sicht des betroffenen Objektes zunächst keine Rolle. Solche Einflüsse lassen sich mithilfe von Umweltsimulationen oder auch Umweltprüfungen im Labor nachstellen. Umweltprüfungen werden individuell angefertigt, um sicherzustellen, dass ein Produkt ausreichend, aber nicht zu stark geprüft wird. Durch die Prüfung verschiedener Umwelteinflüsse und entsprechender Qualifizierung eines technischen Produktes, kann die Qualität und Zuverlässigkeit für den Kunden erhöht und geringere Kosten für Rückruf- oder Garantiefälle erzielt werden. [21] Umwelteinflüsse lassen sich in unterschiedliche Kategorien einteilen. Diese sind in der Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Einteilung von Umwelteinflüssen [22]

<b>Mechanisch</b> - Vibration - Stöße, Schocks - Statische Kräfte - Reibung	<b>Druck</b> - Unterdruck - Überdruck - Druckwechsel	<b>Temperatur/Klima</b> - Hohe Temperatur - Tiefe Temperatur - Temperaturwechsel - Temperaturschock - Feuchte (+ Temperatur) - Betauung, Frost
<b>Staub</b> - Sedimentierender Staub - Staub + Wind	<b>Korrosion</b> - Gasförmige Reaktionspartner - Flüssige (neblige) Reaktionspartner	<b>Strahlung</b> - Sonne - UV - Radioaktivität
<b>Niederschläge</b> - Regen - Schnee, Graupel - Hagel	<b>Chemikalien</b>	<b>Akustische Anregung</b>
	<b>Biologische Einflüsse</b>	<b>Elektromagnetische Einflüsse</b>

Um diverse Komponenten im Fahrzeug bei derartigen Umwelteinflüssen testen und absichern zu können, haben sich verschiedene Varianten und Konzepte etabliert. Um Verunreinigungen und Verschmutzungen reproduzierbar und vergleichbar prüfen zu können werden eigens entwickelte Prüfstäube verwendet. Beispielsweise wird der sogenannte Arizona-Dust nach ISO 12103-1 herangezogen. Dieser Staub besteht hauptsächlich aus mineralischem Siliziumdioxid bzw. Quarz in verschiedenen genau definierten Körnungsgrößen, die miteinander gemischt werden. Darüber hinaus gibt es auch spezielle Sensorprüfstäube, welche auf den Prüfmethode für Scheinwerferreinigung gemäß ECE R45, basieren. Dieser Prüfstaub enthält einen 20-prozentigen Anteil an Volleipulver, um insektenähnliche Proteine nachbilden zu können. [23] Bei solchen Prüfungen steht jedoch meist die Hardware oder Reinigungsleistung im Vordergrund - nicht jedoch der Einfluss auf die Detektionszuverlässigkeit eines Sensors. Im nachfolgenden Kapitel 2.4 werden zwei Varianten detailliert vorgestellt. Für die vorliegende Arbeit wird jedoch ein Konzept benötigt, das sich auf die kontrollierte und reproduzierbare Verschmutzung von Kamera-Sensorik bezieht. Hierzu wird im Kapitel 3 die genaue Methodik erläutert und durchgeführt.

## 2.3 Verschmutzungsmechanismen an Fahrzeugen

Wasser und eventuell mitgeführter Schmutz führen zur Verschmutzung des Fahrzeugs. Grundsätzlich können Verschmutzungen durch feste Partikel (wie z.B. Staub etc.) und durch flüssige Partikel (wie z.B. Regen) verursacht werden. Da im Folgenden der Schwerpunkt auf der Verschmutzung durch Flüssigkeiten (Regen, nasse Fahrbahn) liegt, wird

auch von einem Nässeintrag ausgegangen, bei dem es sich in der Regel um Wasser-Schmutzgemische handelt. Die Fahrzeugverschmutzung kann nach den Definitionen von Potthoff in Eigen- und Fremdverschmutzung unterteilt werden. [24] Abbildung 13 zeigt die für die Fahrzeugverschmutzung relevanten Bereiche.

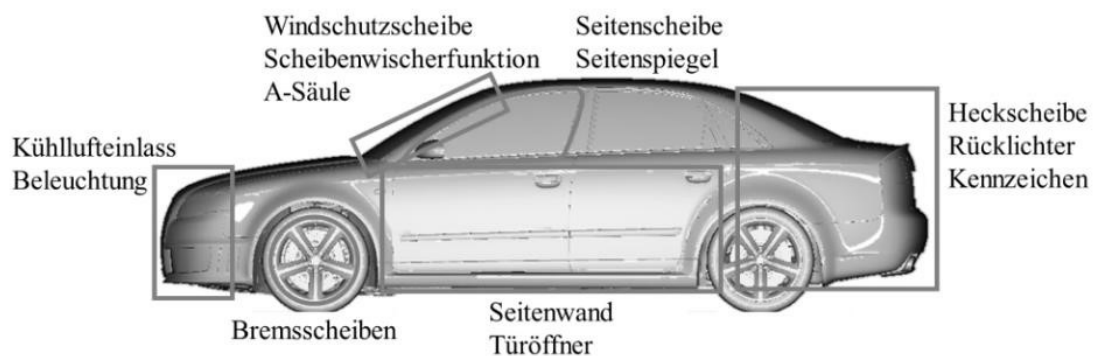


Abbildung 13: Im Hinblick auf die Kfz-Verunreinigung kritische Bereiche [25]

### 2.3.1 Arten der Verschmutzung

#### Eigenverschmutzung

Die Eigenverschmutzung ist das Ergebnis der Drehung des Rades auf nasser Fahrbahn ohne Beeinflussung durch andere Verkehrsteilnehmer. Dieser Vorgang kann in mehrere Phasen unterteilt werden. Zum einen wird das Wasser durch den Reifen nach vorne und zur Seite verdrängt. Auf der anderen Seite wird das Wasser auf der Straße durch die Adhäsionskräfte des Reifens aufgenommen und tangential abgespritzt, sobald die Fliehkräfte des rotierenden Rades die Adhäsionskräfte übersteigen. Ist der Durchmesser der Radmulde klein genug, können die Tröpfchen der Strömung gut folgen. Die Flugbahn größerer Tropfen wird hauptsächlich durch das Zusammenwirken von Strömungs- und Trägheitskräften bestimmt. Nach einer bestimmten Wegstrecke zerplatzen die abgeschleuderten Tröpfchen und bilden Sekundärtropfen. Dieser Vorgang wird nach Pilch und Erdman mit der Weber-Zahl beschrieben. [25]

Die Weber-Zahl ( $We$ ) ist eine wichtige Größe, die zur Charakterisierung von Tropfenphänomenen bei der Verschmutzung von Kraftfahrzeugen herangezogen werden kann. Die Weber-Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl der Strömungsmechanik. Sie gibt das Verhältnis zwischen der deformierenden Trägheitskraft der relativen Umströmung und der stabilisierenden Oberflächenkraft ( $\sigma_L$ ) eines Tropfens an. Sie wird verwendet, um

Aussagen über die Verformung oder Zerfall eines Tropfens zu machen, siehe hierzu Formel 1. [26]

$$We = \frac{\rho_L * u^2 * l}{\sigma_L} \quad \text{Formel 1}$$

Zusätzlich bilden sich beim Eindringen der Tröpfchen in den Radkasten Sekundärtropfen, die aufgrund ihrer geringen Trägheit mit der Strömung aus dem Radkasten austreten können. In der Literatur werden diese Vorgänge häufig als Splash und Spray bezeichnet. [25]

Splash bezieht sich auf größere Tropfen, die versprüht werden und aufgrund ihrer Masse eine hohe Trägheit aufweisen. Da diese Tropfen in der Regel in Bodennähe verbleiben, hat der von Kraftfahrzeugen erzeugte Splash keinen großen Einfluss auf die sicherheitsrelevante Verschmutzung des Sichtfeldes des Fahrers oder bei Begegnungsverkehr. Für Kameras oder andere Arten von Sensoren, die in geringer Höhe angebracht sind, kann diese Art der Verschmutzung allerdings als kritisch angesehen werden. [25]

Der Spray besteht im Gegensatz zum Splash aus vielen winzigen Tröpfchen, die sich aufgrund ihrer geringen Masse und der damit verbundenen kleinen Trägheit über einen längeren Zeitraum in der Luftströmung um das Fahrzeug und besonders in dessen Nachlauf halten können. Durch sehr kleine Tröpfchen kann es zur Bildung von Nebel kommen. [25]

### **Fremdverschmutzung**

Wie in Eigenverschmutzung beschrieben, bildet das vom/von vorausfahrenden Fahrzeug/en aufgewirbelte Wasser die Quelle für die Fremdverschmutzung. Eine Darstellung befindet sich in Abbildung 14. In diesem Fall befinden sich Tropfen in der Anströmung des Fahrzeugs, die zu unterschiedlichen Verschmutzungsbildern auf den nachfolgenden Fahrzeugen führen. Wenn diese Tropfen auf die Fahrzeugoberfläche treffen, können sie entweder an der Oberfläche haften bleiben oder beim Aufprall zerplatzen. Es bilden sich sogenannte Tochter- oder Sekundärtropfen. Die Schwerkraft und die Strömungsverhältnisse führen dazu, dass die auf der Fahrzeugoberfläche verbliebenen Tropfen zu Rinnsalen verlaufen. Durch die bei turbulenter Strömung auftretenden Scherkräfte wird das auf der Fahrzeugoberfläche haftende Schmutzwasser in Richtung A-Säule und über das Dach befördert. Dies führt zusätzlich zu einer Verschmutzung der Seiten- und Heckbereiche. Besonders gefährdet ist in erster Linie allerdings die Front des Fahrzeugs und alle dort verbauten Komponenten sowie Sensoren. Seitenspiegel und dortige etwaige angebrachte Kameras sind ebenfalls einer hohen Last durch Fremdverschmutzung ausgesetzt. Das



Abreißen von Tropfen an den Kanten dieser Oberflächen, verschmutzt zusätzlich die Seiten des Fahrzeugs. [25]

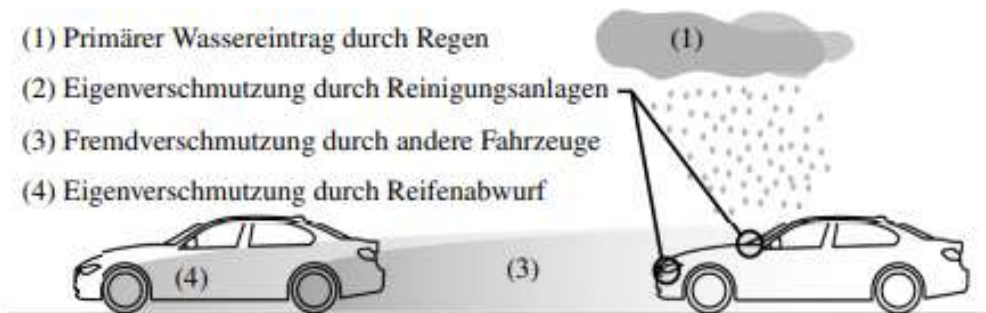


Abbildung 14: Quellen der Fahrzeugverschmutzung [27]

### 2.3.2 Strömungsmechanische Eigenschaften bei Verschmutzung

Zum besseren Verständnis der Verschmutzungsproblematik ist es wichtig, das grundsätzliche Verhalten von Wassertropfen in einer freien, inhomogenen Strömung beim Auftreffen auf eine Wand oder eine bereits vorhandene Wasserschicht zu verstehen. Dies erleichtert das Erkennen von Phänomenen und die Entwicklung von Abhilfemaßnahmen. Abhängig von ihrer spezifischen Größe beschreiben die Tropfen in der freien Strömung eine Bahn, die von den Stromlinien stark abweichen kann. Darüber hinaus haben Tropfen das Potential, ihre Form, Größe und damit auch ihr Gewicht zu ändern. Die Stabilität eines Tropfens in freier Strömung wird im Wesentlichen von sechs Kräften beeinflusst: der Trägheit, der Flüssigkeit und des Gases, der Zähigkeit der beiden Phasen, der Gravitation und der Oberflächenkraft der Flüssigkeit. [28]

#### Tropfen in freier Strömung

Hierbei unterscheidet man zwei Mechanismen. Der Erste ist die Aufspaltung der Wassertropfen, der Zweite die Vereinigung der Wassertropfen. Zweiteres nennt man in der Literatur Koaleszenz. Die Aufprallenergie und die entgegenwirkende Adhäsionskraft bestimmen, wie die Tropfen zusammenwachsen. Der Tropfen-Tropfen-Kontakt führt dabei allerdings nicht immer zur Koaleszenz. Mit Hilfe der Weber-Zahl, siehe Formel 1, kann bestimmt werden, wie die einzelnen Tropfen zerfallen. Entscheidend ist dabei das Verhältnis von Oberflächenkraft zu Trägheitskraft. [28]

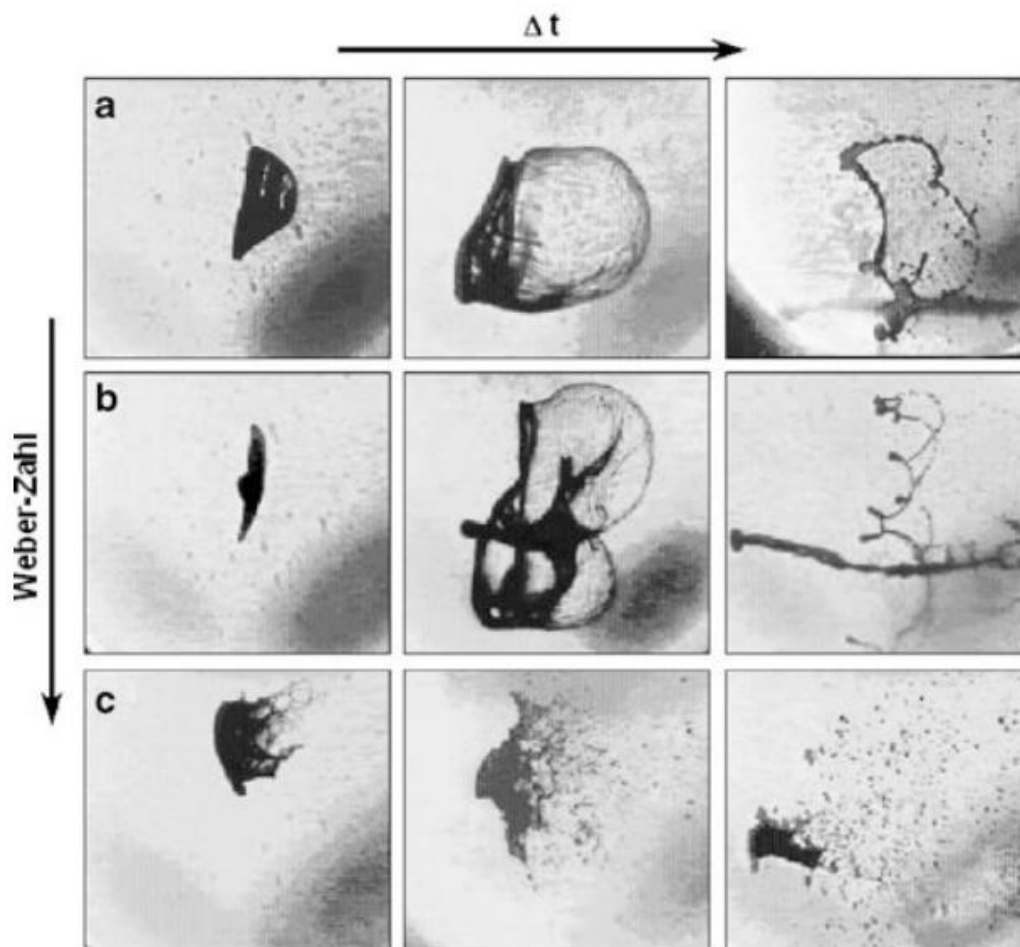


Abbildung 15: die Mechanismen des Aufbrechens eines Tropfens in freier Strömung dargestellt. a) Blasenzerfall, b) Keulenzерfall, c) Scheibenzerfall [28]

Abbildung 15 zeigt die unterschiedlichen Zerfallsmechanismen von Tropfen. Diese lassen sich wie folgt beschreiben:

a. Blasenzerfall

Bei diesem Zerfallsmechanismus wird der Tropfen durch die Druckverteilung in die am Rand entstehenden Unterdruckgebiete ausgedehnt. Es entsteht ein flacher, scheibenförmiger Tropfen. Das Zentrum des Tropfens dehnt sich zu einer Blase mit ringförmigem Rand aus. Dieser dicke Rand bewegt sich schneller stromabwärts als die dünnere Blasenstruktur, wodurch die Blase platzt. Schließlich zerfällt auch der Ring in feine Tröpfchen. Der Blasenzerfall hängt stark von der Oberflächenspannung des Tropfens ab und tritt bei niedrigen Weber-Zahlen auf. [28]

b. Keulenerfall

Dieser Mechanismus ist dem Blasenzerfall sehr ähnlich. Aufgrund der höheren Weber-Zahl und der damit verbundenen höheren Oberflächenenergie bildet sich in der Mitte der Blase eine Flüssigkeitssäule, die die Blase ähnlich einem Regenschirm aufspannt. Diese zerfällt nach dem Platzen der Blase. [28]

c. Scheibenzerfall

Infolge der Druckverteilung bildet sich bei hohen Weber-Zahlen ein scheibenförmiger Tropfen, der jedoch keine Blase bildet, sondern durch Umströmung von feinen Tröpfchen an den Rändern abgelöst wird. Der Tropfen löst sich also beim Zerfall der Scheibe von den äußeren Rändern her auf. [28]

### **Aufprall von Tropfen**

Treffen Tropfen auf eine Oberfläche können die dabei entstehenden Mechanismen in vier Gruppen eingeteilt werden. Entscheidend dabei ist die Geschwindigkeit des Tropfens, sowie dessen Größe und Aufprallwinkel. Zusätzlich wird das Verhalten des Tropfens beim Auftreffen auf eine Oberfläche von weiteren Materialeigenschaften wie der Oberflächenrauigkeit, der Oberflächenspannung und der Oberflächenenergie beeinflusst. [28]

Nach Stanton, Rutland und Schmehl, entstehen nachfolgende Mechanismen, welche in Abbildung 16 dargestellt sind:

a. Haftung (Stick)

Hierbei handelt es sich um das Phänomen, dass die Wassertropfen beim Aufprall auf die Oberfläche haften bleiben und einen Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche bilden. Möglich ist dies nur bei einer kleinen Aufprallenergie, also bei einer kleinen Weber-Zahl.

b. Reflexion (Rebound)

Hierbei handelt es sich um das Phänomen, dass die auftreffenden Tropfen von der Oberfläche abprallen, ohne zu kleben oder zu spritzen. Dieses Verhalten tritt besonders dann auf, wenn bereits Flüssigkeit auf der Oberfläche vorhanden ist und neue Tropfen mit kleiner Weber-Zahl auf die Oberfläche auftreffen. In diesem Fall sorgen eingeschlossene Luftpartikel auf der nassen Oberfläche für eine Art Trampolin Effekt, wodurch der auftreffende Tropfen wieder zurück reflektiert wird.

c. Koaleszenz (Spread)

Dies bezieht sich auf die Ausbreitung des Flüssigkeitsfilms auf der Oberfläche aufgrund der Oberflächenspannung und anderer Kräfte. Dabei zerfließt ein Tropfen vollständig, wenn er auf eine trockene Fläche trifft. Ist diese bereits nass, verbindet sich der Tropfen mit der bereits vorhandenen Nässe. Das nutzbare Energiefenster für dieses Verhalten ist allerdings beschränkt. Bei einer zu kleinen Weber-Zahl entsteht Rebound, bei zu großer Splash.

d. Destruktion (Splash)

Dies bezieht sich auf den Spritzeffekt, der auftritt, wenn die auftreffenden Wassertropfen beim Aufprall auf die Oberfläche in kleinere Tröpfchen zerfallen. [29]

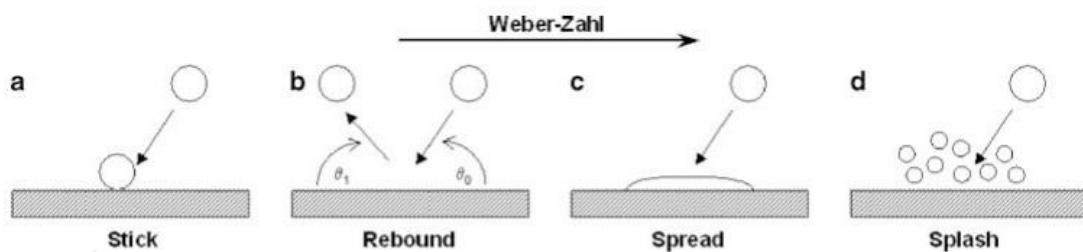


Abbildung 16: Aufprallmechanismen von Tropfen auf Oberflächen; a) Haftung, b) Reflexion, c) Koaleszenz, d) Destruktion [28]

### 2.3.3 Methoden zur Sichtbarmachung und Messung von Verschmutzung

#### Fluoreszenzmethode

Potthoff veröffentlichte in den siebziger Jahren die ersten Aufzeichnungen über die Verschmutzung an Fahrzeugen. Sein Ziel war es, Straßenversuche in den Windkanal zu verlegen, um dort reproduzierbare Versuchsbedingungen zu erzielen. Die Verwendung von Kreide - Wassergemischen war eine erste Möglichkeit, die Verschmutzung sichtbar zu machen und zu dokumentieren. Als weitere Vorteile des Prüfstandes nennt Potthoff die Wetterunabhängigkeit, die kurzen Prüfzeiten und den besseren Schutz der Prototypen. Allerdings entstanden durch diese ersten Gemische in den Windkanälen selbst sehr große Verschmutzungen, die einen erheblichen Reinigungs - und Kostenaufwand zur Folge hatten. Kalkpartikel haben zudem einen abrasiven Effekt, welcher zusätzliche Probleme an Testfahrzeugen sowie der Testumgebung verursachte [24]

Aufgrund dieser Nachteile wurden neue Methoden entwickelt. Eine von ihnen, die sich bis heute durchgesetzt hat, ist die Fluoreszenzmethode. Hierbei wird dem Wasser ein geringer Volumenanteil eines fluoreszierenden Additivs zugesetzt. Unter UV-Beleuchtung können so die Kontraste von kritischen und unkritischen Verschmutzungsbereichen erkannt und bewertet werden. Ebenfalls lassen sich so auch direkt Maßnahmen zur Vermeidung von solchen Verschmutzungen überprüfen, wie sich am Beispiel des Audi Q3 zeigen lässt, siehe hierzu Abbildung 17. Diese Methode wird auch noch heute in der Entwicklung eingesetzt und ist Teil der Aerodynamikentwicklung. [30]

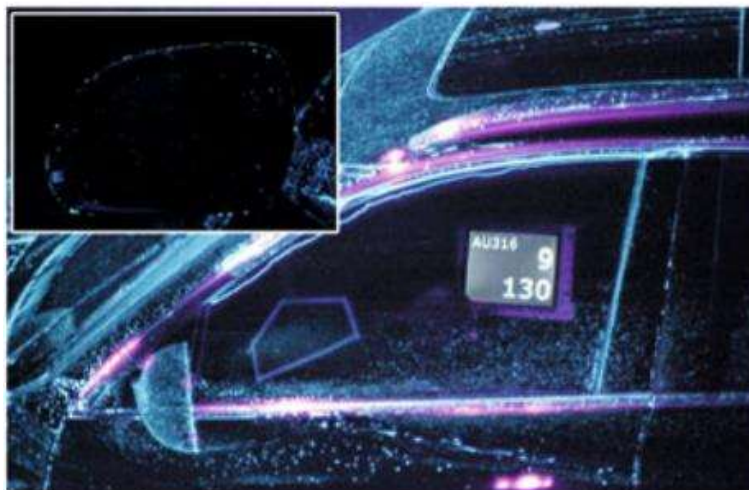
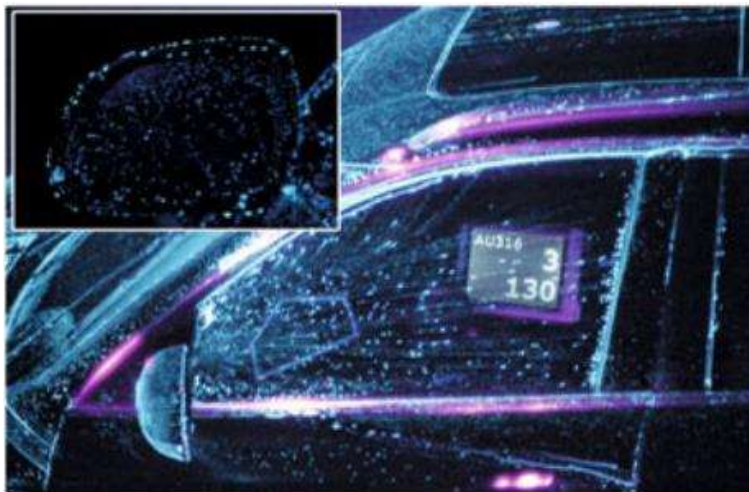


Abbildung 17: Verschmutzungsanalyse mittels Fluoreszenzmethode von Seitenscheibe und Spiegelglas. Oben: Prototyp ohne Maßnahmen. Unten: Prototyp mit optimiertem Zustand. [31]

### Digitale Verschmutzungsanalyse DiVeAn®

Die Fluoreszenzmethode wurde ständig weiterentwickelt. So kombinierten Widdecke et al. diese Technologie mit einer digitalen Bildverarbeitung. Unter dem Namen DiVeAn®

(Digitale Verschmutzungsanalyse) ist es seitdem erstmals möglich, Verschmutzungen quantitativ zu messen. [27] Ähnlich wie bei der Fluoreszenzmethode wird dem Wasser ein Additiv zugesetzt. UVITEX 2BT ist hierfür besonders geeignet, da es Licht im Wellenlängenbereich von 350-380 nm absorbiert bzw. im Wellenlängenbereich von 420-470 nm emittiert und somit fotografisch oder videotechnisch detektiert und aufgezeichnet werden kann. Die Bildverarbeitungssoftware von DiVeAn<sup>®</sup> untersucht den Grauwert eines digitalen Bildes oder eines einzelnen Bildes einer Bildfolge in Bezug auf die Farbintensität eines einzelnen RGB-Farbkanals für die Grundfarben Rot, Grün und Blau. Da der Fluoreszenzfarbstoff die Fähigkeit besitzt, die aus dem ultravioletten Licht absorbierte Energie hauptsächlich im blauen Farbspektrum abzugeben, wird bei diesem Ansatz der blaue Farbkanal für die Auswertung verwendet. Daher ist es möglich, durch eine 8-Bit-Auflösung des Grauwertes 256 verschiedene Verschmutzungsgrade zu erhalten. Um belastbare Aussagen über die verschmutzte Oberfläche treffen zu können, wurden zwei Bewertungsgrößen eingeführt: [25]

Der dimensionslose „Average Contamination Factor“  $\overline{CF}$  beschreibt die mögliche Schmutzbelastung zwischen unverschmutztem und maximal verschmutztem Zustand in 256 Stufen und dient zur quantitativen Beschreibung der Fahrzeugverschmutzung. Dazu wird jeder Pixel  $i$  in seine RGB-Komponenten zerlegt und der Grauwert des blauen Farbkanals ( $CF_i$ ) für den gesamten interessierenden Bildbereich aufsummiert und gemittelt. Die mittlere Leuchtdichte des betreffenden Bereichs wird als  $\overline{CF}$  bezeichnet, siehe hierzu Formel 2. [25]

$$\overline{CF} = \frac{\sum_{i=1}^n CF_i}{n} \quad \text{Formel 2}$$

Durch die Einführung des Verschmutzungsgrades (VG) kann die benetzte Fläche prozentual zur Gesamtfläche des verschmutzungsrelevanten Bereiches berechnet werden. Mithilfe eines zusätzlichen Filterwertes (FW) kann festgelegt werden, ab welcher Leuchtintensität ein Pixel als verschmutzt oder sauber eingestuft wird. Die Berechnung erfolgt nach Formel 3. [25]

$$VG = \frac{\sum_{i=1}^n (CF_i > F) * 100\%}{n} \quad \text{Formel 3}$$

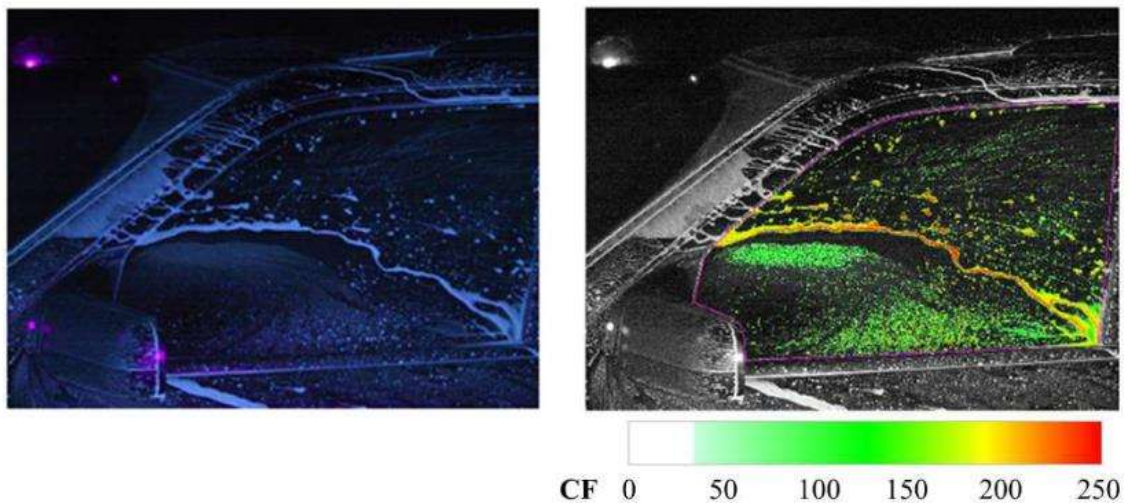


Abbildung 18: Vergleich zwischen Fluoreszenz Methode (links) und DiVeAn® Methode inkl. Darstellung einer Farbskala (rechts) [25]

## 2.3.4 Einflussfaktoren

### Oberflächeneinfluss

Das Problem der Verschmutzung im Pkw Bereich kann sich je nach Beschaffenheit der Oberfläche verschlechtern oder auch verbessern. Entscheidend dafür ist das Zusammenspiel der Oberflächenspannung mit der Oberfläche selbst. Eine hydrophobe Oberfläche mit wasserabweisenden Eigenschaften hat eine niedrige Oberflächenspannung. Dies führt zu einem Perl-Effekt, auch „Lotus-Effekt“ genannt. Dieser wurde erstmals vom Botaniker W. Barthlott bei Beobachtung der Lotuspflanze entdeckt. Bei dieser Pflanze beträgt der Kontaktwinkel von reinem Wasser über  $90^\circ$ , wodurch das Wasser sich zu einem Tropfen zusammenzieht und einfach von der Oberfläche der Blätter abperlt. Eine hohe Oberflächenspannung kennzeichnet eine hydrophile Oberfläche mit wasseranziehenden Eigenschaften, was zu einem kleinen Kontaktwinkel ( $< 10^\circ$ ) zwischen Wassertropfen und Oberfläche führt, siehe hierzu Abbildung 19. Der Einsatz von hydrophob und hydrophil beschichteten Scheiben wurde mehrfach untersucht und wird auch bei verschiedenen Herstellern eingesetzt. Unter anderem verwendet Porsche hydrophobe Seitenscheiben, sowie hydrophile Außenspiegelgläser [32]. Ziel des Perleffekts ist es, kleine Wassertropfen durch den Fahrtwind aus dem Sichtfeld zu entfernen, so dass der Einsatz der Scheibenwischer reduziert wird und auch Verschmutzungen wie Insekten, aufgewirbelte Schmutzpartikel oder Vereisungen leichter entfernt werden können. Allerdings verlieren diese Beschichtungen mit der Zeit ihre Wirksamkeit. [28] Gerade im Bereich der Windschutzscheibe kann eine solche Beschichtung auch Nachteile haben. Der

Scheibenwischer kann nur dann effektiv arbeiten, wenn zwischen Gummilippe und Scheibe ein kleiner Wasserfilm verbleibt. Fällt dieser durch die Hydrophobierung weg, ruckelt der Wischer über die Scheibe und es entstehen Schlieren. [27]

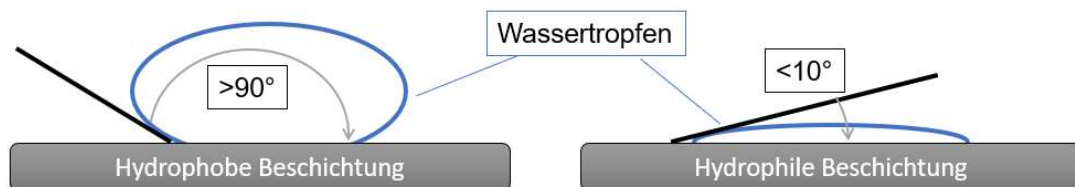


Abbildung 19: Kontaktwinkel Darstellung zwischen hydrophober und hydrophiler Beschichtung [28]

Wie groß die Unterschiede im Fließverhalten des Wassers auf diesen Oberflächen sein können, zeigt Abbildung 20. Das linke Bild zeigt das Fließverhalten eines Fahrzeugs, das ca. 1.200 km im normalen Straßenverkehr unter verschiedenen Witterungsbedingungen (Schnee, Regen, Staub usw.) gefahren wurde. Im mittleren Bild wurde das Fahrzeug gewaschen. Hier ist bereits deutlich zu erkennen, wie die Wandfilmbildung reduziert wird und sich in mehrere einzelne Rinnsale trennt. Wird die Oberfläche zusätzlich poliert, erhält man das rechte Bild. Die Wandfilmbildung ist nicht mehr vorhanden. Fast das gesamte Wasser bewegt sich in Tropfenform über die Oberfläche. [25] Die Sichtbarmachung erfolgte mittels Fluoreszenzmethode, siehe hierzu Erläuterungen in Kapitel 2.3.3.

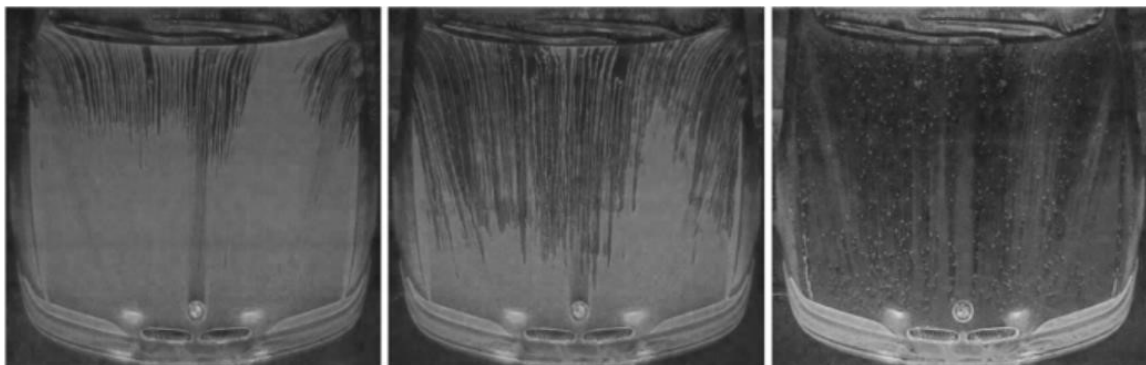


Abbildung 20: Vergleich des Fließverhaltens von Wasser auf unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten. Links: Unbehandelt, Mitte: gewaschen, Rechts: gewaschen und poliert [25]

## Niederschlag

Für die Untersuchung der Sichtfreihaltung sind Parameter wie die Niederschlagsintensität und das damit verbundene Tropfenspektrum wichtige Randbedingungen und Grundlage für die Übertragung einer Regenfahrt auf den Prüfstand sowie die numerische Simulation.



Betrachtet man die reine Regenfahrt, ohne Fremdverschmutzung, so hängt der Wassereintrag auf ein Fahrzeug lediglich von der Fahrgeschwindigkeit und der Niederschlagsintensität  $R$  ab. Sie beschreibt die Höhe der Wassersäule pro Quadratmeter in Abhängigkeit der Zeit. Die Tropfenform hängt dabei allerdings stark von der Größe und der terminalen Fallgeschwindigkeit ab. Diese lässt sich experimentell ermitteln. Der Ansatz von Tokay und Short hat sich in der Meteorologie durchgesetzt. [27] Durch Analyse der Niederschlagsaufzeichnungen, konnten sechs Kategorien für die Regenintensität ermittelt werden. [33]. Tabelle 5 beschreibt diese.

Tabelle 5: Niederschlagskategorien nach Tokay und Short [33]

Kategorie	R [mm/h]
sehr leicht	$R < 1$
leicht	$1 \leq R < 2$
moderat	$2 \leq R < 5$
stark	$5 \leq R < 10$
sehr stark	$10 \leq R < 20$
extrem	$20 \leq R$

Caracciolo et al. hat diese sechs Kategorien mittels Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zusätzlich um die zu erwartende Tropfengröße erweitert, siehe hierzu Abbildung 21. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Regenintensität das Tropfenspektrum breiter wird. Es verschiebt sich hin zu größeren Tropfendurchmessern. [30]

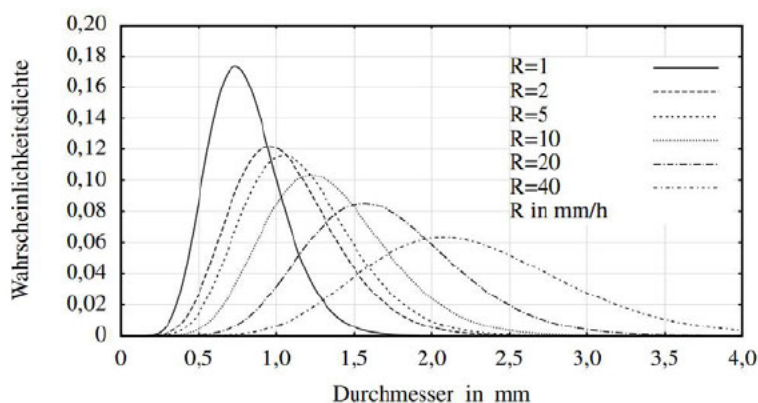


Abbildung 21: Tropfendurchmesser in Abhängigkeit der Regenintensität mittels Wahrscheinlichkeitsdichte [30]

## 2.4 Bestehende Reinigungsvorschriften im Pkw

Untersuchungen in Schweden haben gezeigt, dass die Lichtleistung der Scheinwerfer bei Schneematsch und dichtem Verkehr bereits nach einer Fahrstrecke von 10 Kilometern aufgrund von Verschmutzung um 90 % abnimmt. [34] Ähnlich verhält es sich mit den Front- und Heckscheiben von Fahrzeugen. Sind diese verschmutzt, hat der Fahrer keine Rundumsicht und die Fahrsicherheit ist in verschiedenen Fahrsituationen nicht gewährleistet. [35]

Diese Problematik wurde bereits in der Vergangenheit von verschiedenen Regulatoriken erkannt, weshalb verschiedene Verordnungen verabschiedet wurden, die einen einheitlichen Test und Auswertung der Verschmutzung erlauben.

### 2.4.1 Scheinwerferreinigung

Bereits eine geringe Menge Staub kann einen Scheinwerfer ähnlich stark wie Insektenrückstände im Sommer verschmutzen. Vor allem für den Gegenverkehr sind verschmutzte Scheinwerfer unangenehm, da sie blenden. [34]

Durch die Verordnung (EG) 2020/575 gibt die EU eine entsprechende Regelung für Scheinwerfer-Reinigungsanlagen vor. [36] In § 50 Abs. 10 StVZO findet sich diese Regelung auch auf deutscher Bundesebene wieder. Um den gesetzlichen Vorschriften gerecht zu werden, haben sich zwei Varianten durchgesetzt. Mechanische kleine Scheibenwischer erzielen eine sehr gute Reinigungsleistung bei geringem Wasserverbrauch. Aus Kostengründen und wegen der Umstellung von Glas- auf Kunststoffstreuscheiben wurden sie jedoch durch Hochdruckwaschdüsen ersetzt. Diese Variante hat bis heute Bestand. [35]

In Abbildung 22 wird ein Funktionsbeispiel einer Scheinwerferreinigungsanlage dargestellt. Es zeigt ein Schnittbild einer Hochdruckdüse, die sich während des Reinigungsprozesses automatisch ausfährt. Der Hub der Düse erfolgt durch den Druck des Waschwassers, sodass sie nach außen gedrückt wird. Wenn der Wasserdruck abfällt, sorgt eine Federrückstellung dafür, dass die Waschdüse automatisch in ihre Ausgangsposition zurückfährt. [35]

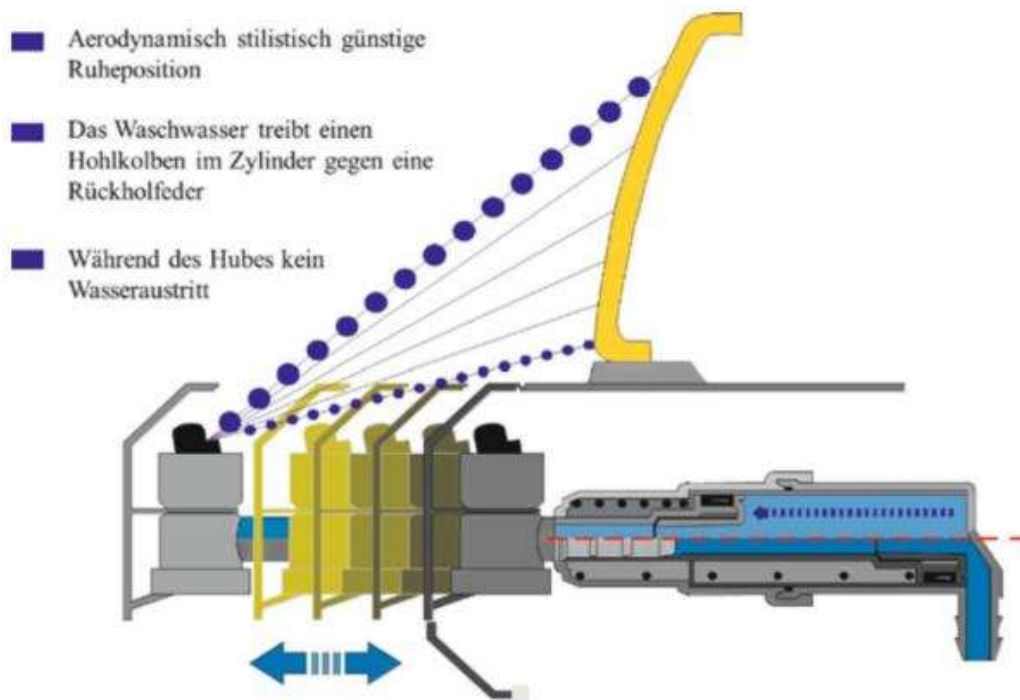


Abbildung 22: Funktionsprinzip einer Scheinwerfer Reinigungsanlage [32]

Nach der UN-Regelung Nr. 45 müssen alle Fahrzeuge, deren Abblendlicht eine Lichtstärke von mehr als 2.000 Lumen (pro Lichtquelle) hat, ab dem 1. April 2000 mit einer Scheinwerferreinigungsanlage ausgerüstet sein. Zur Überprüfung der Reinigungsleistung muss die Anlage zur Reinigung der Scheinwerfer einem genormten Verfahren unterzogen werden. Dabei ist zunächst die Lichtstärke des Scheinwerfers im sauberen Zustand an drei definierten Punkten zu messen. Anschließend wird mit einer Sprühpistole ein Schmutzgemisch auf die gesamte Lichtaustrittsfläche aufgesprüht und getrocknet. Der Verschmutzungsvorgang ist so oft zu wiederholen, bis nur noch höchstens 20 % der Lichtstärke des unverschmutzten Zustandes vorhanden sind. Anschließend wird die Reinigungseinrichtung betätigt, wobei der Reinigungsvorgang nicht länger als 10s dauern darf. Nach Abschluss des Vorgangs ist die Lichtstärke erneut zu messen. Sie muss mindestens 70 % der im sauberen Zustand gemessenen Lichtstärke betragen. Das zu verwendende Schmutzgemisch ist je nach Scheinwerfertyp unterschiedlich. Im Allgemeinen besteht es aus Silikatsand, Buchenholzkohlenstaub, Natriumsalz der Carboxymethylcellulose (NaCMC), Natriumchlorid und Wasser [36]. Die Basis dieses Gemischs bildet dabei ein genormter Prüfstaub.

Wie groß der Unterschied zwischen gereinigtem Scheinwerfer und verschmutztem Scheinwerfer ist geht aus Abbildung 23 hervor.

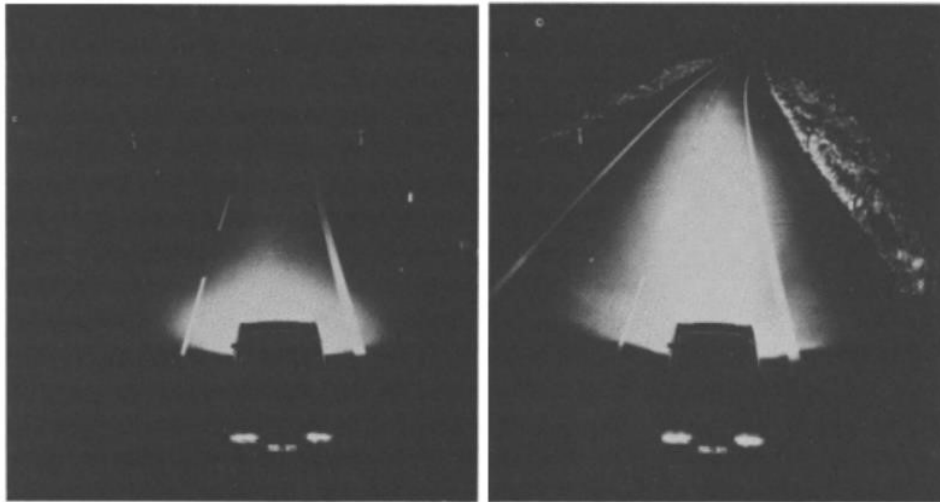


Abbildung 23: Darstellung des Einflusses der Verschmutzung auf die Leuchtstärke von Scheinwerfern. Links: verschmutzter Zustand. Rechts: mit Scheinwerferreinigung gereinigter Scheinwerfer [34]

In Premiumfahrzeugen ist es zudem üblich, dass Schmutzsensoren mit in das Scheinwerfergehäuse integriert werden. Diese sind an der Innenseite der Streuscheibe sowie im Reinigungsbereich angebracht. Bei sauberer oder regenbedeckter Streuscheibe kann das Messlicht im nahen Infrarotbereich ungehindert nach außen dringen. Nur ein kleiner Teil wird in den Lichtempfänger zurückreflektiert. Erkennt das Messlicht jedoch Schmutzpartikel auf der Außenfläche der Streuscheibe, wird es proportional zum Verschmutzungsgrad in den Empfänger zurückgestreut und löst die Reinigungseinrichtung aus, vgl. Abbildung 24. [35]

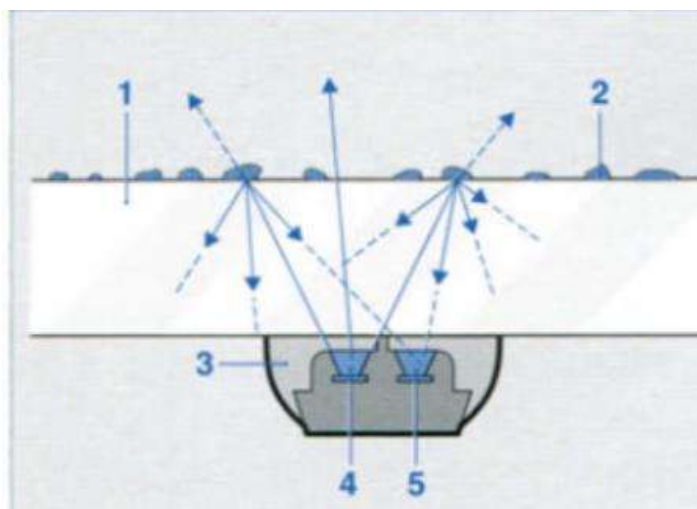


Abbildung 24: Schmutzsensoren in Scheinwerfern, 1) Streuscheibe, 2) Schmutzpartikel, 3) Sensorelement, 4) Sender, 5) Empfänger [35]

## 2.4.2 Scheibenreinigung

Es ist wichtig, dass die Scheibenwischer eines Autos alle Wasser- und Schmutzpartikel von der Windschutzscheibe entfernen, um eine klare Sicht zu gewährleisten. Dies muss auch bei starkem Regen und hohen Geschwindigkeiten funktionieren. In der Literatur und in den Prüfverfahren wird in Wischer - und Waschanlagen unterschieden. Ein Scheibenwischersystem besteht aus einem Elektromotor als Antrieb, einem Getriebe, den Scheibenwischerarmen mit Scheibenwischerblättern sowie einem Schalter. Dieser ist normalerweise an der Lenksäule angebracht. Ein Regensensor, ein Verzögerungsrelais und ein Intervallrelais können das System erweitern. Die zugehörige Scheibenwaschanlage besteht aus einer Pumpe mit entsprechendem Motor, Waschflüssigkeitsbehälter, Düsen zum Aufsprühen der Waschflüssigkeit auf die Windschutzscheibe und Schlauchanschlüssen. Die Betätigung erfolgt meist wiederum über den Schalter an der Lenksäule. [35] Um die Funktionsfähigkeit solcher Systeme nachzuweisen, müssen die Wischer - und Waschanlagen genormte Prüfabläufe durchlaufen und bestehen. Die dazu relevante Verordnung ist die VO (EG) 1008/2010. [37] Dazu wird je nach Fahrzeugtyp der zu prüfende Sichtbereich festgelegt, der in einen Sichtbereich A und einen reduzierten Sichtbereich B unterteilt wird, siehe hierzu Darstellung in Abbildung 25. Die exakten Abmessungen lassen sich nach der UN-Regelung 43 bestimmen. [38]

Die Scheibenwischeranlage muss so ausgelegt sein, dass 98 % des Sichtfeldes A und 80 % des Sichtfeldes B abgedeckt werden. Zur Überprüfung der Waschleistung wird zunächst das entstandene Wischfeld auf ein Transparentpapier übertragen. Die Waschanlage wird nur mit normalem Leitungswasser gefüllt. Anschließend wird die Außenseite der Windschutzscheibe vorbehandelt. Dabei wird die Scheibe mit einer Alkohollösung gründlich entfettet und mit einer amoniakhaltigen Lösung nachbehandelt. Anschließend wird die Prüflüssigkeit gleichmäßig auf die Scheibe aufgetragen und getrocknet. Nach höchstens zehn vollständigen Funktionszyklen muss die Waschanlage mindestens 60 % des ursprünglichen Sichtfeldes A gereinigt haben. Das entsprechende Wischbild wird wiederum auf Transparentpapier übertragen und die so erhaltene Fläche mit der Originalen verglichen. [37]

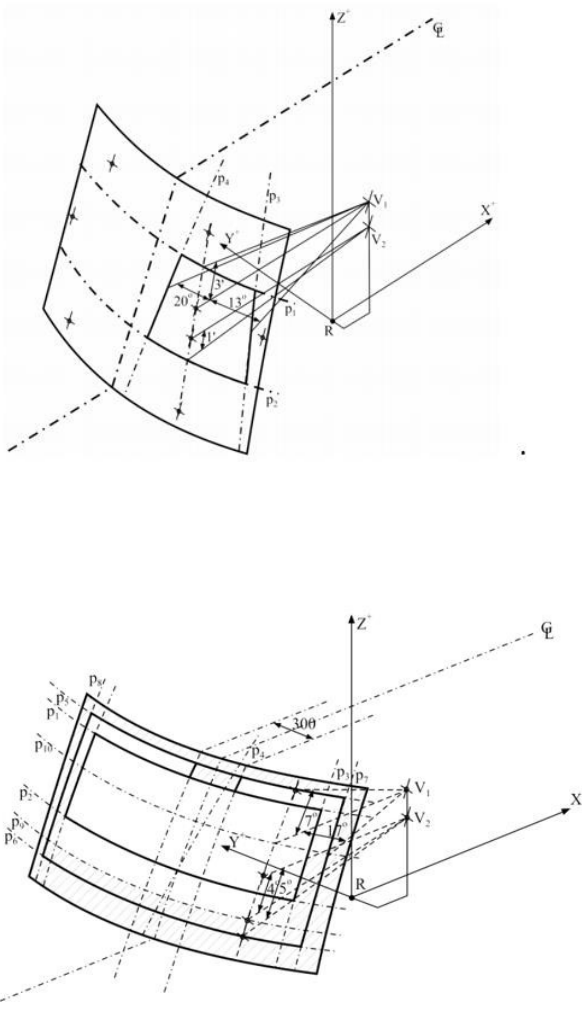


Abbildung 25: Darstellung der Frontscheiben Sichtbereiche vom Pkw-Linkslenker; oben: Sichtbereich A, unten: reduzierter Sichtbereich B [37]

## 3 Experimentelle Untersuchung

### 3.1 Versuchsvorbereitung

#### 3.1.1 Allgemeine Überlegungen

In den vorherigen Kapiteln wurde ein Überblick über die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von Kameras im Automobil sowie deren Technik und Funktionsweise gegeben. Da in Zukunft solche Systeme auch umfänglich Fahraufgaben, fahrerlos übernehmen werden, wird es notwendig werden Systemgrenzen zu erkennen und abzuprüfen. Besonders bei kamerabasierten Systemen hat sich in der Literaturrecherche herausgestellt, dass Verschmutzungen einen erheblichen Einfluss haben. Allerdings gibt es hierfür noch keine dokumentierten Prüfverfahren oder anerkannte Methoden. Dies hat schlussendlich zur Problemstellung dieser Arbeit geführt. Ziel ist es eine Methodik auszuarbeiten und zu testen, mit der relativ einfach und reproduzierbar, kamerabasierte Systeme auf ihre Verschmutzungsresistenz getestet werden können. Ziel soll es sein, mit dieser Methodik Effekte auf ein kamerabasiertes System festzustellen bzw. die Systemgrenze zu finden. Im Anschluss würde sich somit bewerten lassen, ob die Erkennungsleistung auch unter schwierigen Bedingungen noch ausreichend ist.

Hierfür bedürfen zwei Kriterien besonderer Aufmerksamkeit. Zum einen der reproduzierbare Auftrag von Verschmutzung (Verschmutzungsklassen), zum anderen die Testumgebung in der ein solches System seine Erkennungsleistung unter Beweis stellen soll. Idealerweise würde für diese Arbeit ein Testfahrzeug mit einem voll ausgestatteten Umweltlabor und entsprechenden Analysewerkzeugen zur Verfügung stehen. Da diese Option leider nicht vorhanden ist, muss eine alternative Modellbetrachtung genutzt werden.

Grundlegend besteht die Idee darin, als Versuchsfahrzeug einen Open-Source Roboterbausatz zu nutzen, der sich mithilfe einer Kamera orientiert und bewegt. Diese Kamera soll anschließend mit verschiedenen Verschmutzungsklassen beaufschlagt werden. Je höher die Verschmutzungsklasse, desto höher soll die Verschmutzung sein. Im Anschluss soll der Roboter einen definierten Parcours bewältigen und allen darin vorkommenden Objekten ausweichen. Wenn die Erkennungsleistung zu stark beeinträchtigt ist, würde es theoretisch zu Kollisionen kommen oder das Fahrverhalten verändert sich in einen nicht mehr vertretbaren Bereich. Damit wäre es möglich, die Performance von kamerabasierten Systemen in Abhängigkeit von Verschmutzung zu bewerten und sich von anderen, nicht beeinflussbaren Abhängigkeiten zu lösen.

Die Basis der Verschmutzungsklassen bilden dabei die standardisierten Prüfmethode zur Scheinwerferreinigung, wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben. Der ausschlagende Messwert der Lichtdurchdringung bzw. dessen Abschwächung scheint als Übernahme sinnvoll.

Diese Methodik soll als Leitfaden dienen, wie kamerabasierte Systeme künftig auf Umwelteinflüsse getestet und freigegeben werden können.

### 3.1.2 Versuchsobjekt

#### Jetbot

Nvidia bietet verschiedene Lösungen und Bausätze in unterschiedlichen Preisklassen an, um ein autonomes Fahrzeug mit Kamerasensorik möglichst realistisch nachzubilden. Die Wahl fällt auf den Waveshare Jetbot. Dieses Set besteht aus zwei Baugruppen: der Recheneinheit Nvidia Jetson Nano und der Fahrzeugplattform Waveshare Jetbot.

#### Nvidia Jetson-Nano

Der Nvidia Nano Jetson ist ein kleines, kostengünstiges und leistungsstarkes System-on-a-Chip (SoC), das für die Entwicklung von künstlicher Intelligenz (KI)-Anwendungen in Robotern und anderen eingebetteten Systemen genutzt wird. Das System ist Open-Source und erlaubt es Benutzern, Software und Hardware zu modifizieren und frei zu erweitern. Er verfügt über einen ARM-Prozessor, eine GPU und eine Vielzahl von Sensoren und Schnittstellen, die ihn für unterschiedlichste Anwendungen geeignet machen, darunter die Bildverarbeitung. Mit dem Jetson Nano lassen sich Bildklassifizierung, Objekterkennung und Bildsegmentierung umsetzen. Damit eignet er sich besonders für Anwendungen wie Gesichtserkennung, Videoüberwachung und autonome Modell-Fahrzeuge. Zusätzlich ermöglicht der Jetson Nano die Steuerung des Roboters. Durch den Einsatz von frei trainierbarer künstlicher Intelligenz ist es möglich, individuelle Anwendungsfälle zu modellieren und somit reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. [39] Aufgrund seiner hohen Leistungsfähigkeit und Kosteneffektivität eignet er sich optimal für die Durchführung dieser Arbeit.

Der Jetson Nano läuft auf einem speziellen Betriebssystem (OS) namens Linux4Tegra OS. Die Programmierungsumgebung ist ein Jetpack Software Development Kit (SDK), das das genannte Betriebssystem, allgemeine Bibliotheken, API-Dateien (Application Programming Interface), Entwickler-Tools, Dokumente, Beispiele, die Compute Unified Device Architecture (CUDA) und das Robot Operating System (ROS) enthält. Das CUDA Toolkit ist eine Entwicklungsumgebung zur Erstellung von hochleistungsfähigen,



GPU-beschleunigten Anwendungen. Es ermöglicht Entwicklern, verschiedene Anwendungen für GPU-beschleunigte Systeme zu erstellen und zu optimieren. ROS ist eine Sammlung von Softwarebibliotheken, die Entwicklern bei der Erstellung von roboterbasierten Anwendungen unterstützt. Es umfasst Treiber, fortschrittliche Algorithmen und leistungsstarke Entwicklerwerkzeuge und ist Open Source. [40]

#### **Technische Daten:** [39]

- a. GPU: 128-Core NVIDIA Maxwell™
- b. CPU: quad-Core ARM A57 mit 1.43 GHz
- c. KI Performance: 472 Milliarden Gleitkommaoperationen pro Sekunde (GFLOPS)
- d. Arbeitsspeicher: 4GB 64-Bit LPDDR4 25.6GB/s
- e. interner Speicher: microSD Karte, 128Gb
- f. Leistungsaufnahme: 5-10W
- g. Kamera: 2x MIPI CSI-2 Anschlüsse
- h. Konnektivität: Gigabit Ethernet, M.2 Key E

#### **Waveshare Jetbot**

JetBot ist ein zweirädriges, autoförmiges System, in das das Jetson Nano-Board und andere Peripheriegeräte wie Sensoren und eine Kamera eingebaut werden. Der selbstfahrende Roboter wird von dem zuvor beschriebenen NVIDIA Jetson Nano Mikroprozessor smart und anwenderbezogen gesteuert. Er wird als Bausatz geliefert und muss vom Nutzer zusammengebaut werden. [41]

Der Bausatz ist in Abbildung 26 dargestellt und besteht aus:

- a) Jetson Nano Entwicklungskit
- b) Kamera-Halterung
- c) Kamera: 8MP, 160° FOV, IMX219 Sensor, 3280 x 2464 Auflösung
- d) JetBot Erweiterungsplatine inklusive Stromversorgung

- e) Wifi Antenne -AC8265
- f) Zwei Antriebsmotoren plus Räder
- g) Zwei Lenkrollen
- h) Schraubenpaket
- i) TF-Kartenleser
- j) Fernsteuerung



Abbildung 26: Waveshare Jetbot Bausatz

### Montage und Einrichtung des Jetbot

Der Zusammenbau des Bausatzes verlief mit Hilfe der vorhandenen Bauanleitung problemlos und es traten keine größeren Schwierigkeiten auf. Aufgrund der Empfindlichkeit und Größe aller Komponenten war es sehr wichtig präzise und sorgfältig zu arbeiten, um Beschädigungen zu vermeiden. Der fertiggestellte Roboter ist in Abbildung 27 dargestellt.

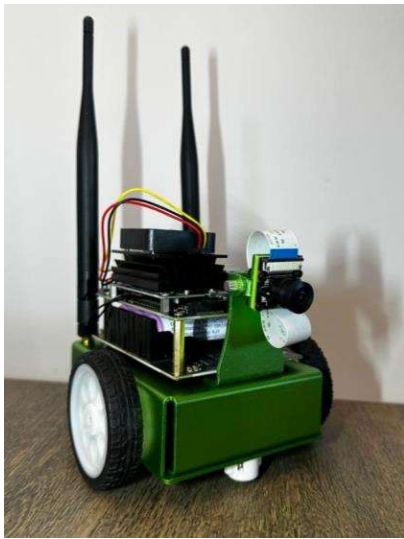


Abbildung 27: Jetbot im montierten Zustand

Nach der Montage wurde der Roboter unmittelbar eingerichtet. Das Basis-Betriebssystem kann von der Waveshare-Website heruntergeladen werden und wird mit Hilfe einer Image-Software direkt auf die Micro-SD-Karte übertragen. Über die HDMI- und USB-Schnittstellen können ein Monitor und eine Tastatur angeschlossen werden, um das System zu konfigurieren. Nachdem der Jetbot erfolgreich mit dem W-LAN verbunden wurde, kann sämtliche Peripherie entfernt werden. Durch die Eingabe der IP-Adresse des Bots in den Browser eines Desktop-PCs, welcher sich im selben Netzwerk befinden muss, kann die gesamte Steuerung vorgenommen werden, wie in Abbildung 28 gezeigt. Die IP-Adresse wird dem Nutzer auf einem kleinen OLED Display auf der Platine des Bot angezeigt. Nach Abschluss aller Tool-Updates wurden erste Systemtests durchgeführt.

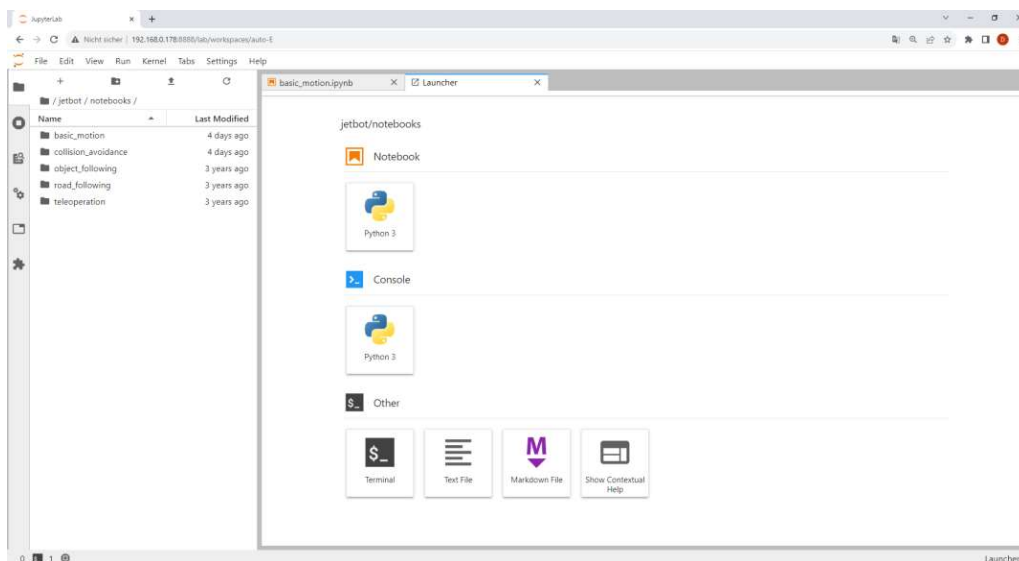


Abbildung 28: Kontrolloberfläche des Jetbot über W-LAN mittels Jupyter Lab

### Montage der Acrylplatten am Jetbot

Der Jetbot besitzt serienmäßig keine Möglichkeit zur Befestigung externer Einrichtungen vor der Kamera. Da dies allerdings notwendig für den experimentellen Teil dieser Arbeit ist, boten sich gegenüber flachen Acrylplatten, Acrylwinkel besonders an. Die Größe des Winkels wurde dabei so ausgewählt, dass der FOV der Kamera vollständig durch die Platte abgedeckt ist. Der Acrylwinkel mit den Abmessungen 10 cm x 8 cm x 10 cm (Länge x Breite x Höhe) musste für die Montage angepasst werden. Um am Stützrad des Jetbots auf der Unterseite vorbeizukommen, war ein 25mm Breiter Schlitz notwendig. Dies konnte mithilfe eines Kunststoff Schneidwerkzeugs gut herausgearbeitet werden. Nun ist es möglich, die Winkel unkompliziert mithilfe von Klettband an der Unterseite des Jetbots zu befestigen und auch zu demontieren, siehe hierzu Abbildung 29. Dies bietet zudem die Möglichkeit eines einfachen Wechsels der Platten.

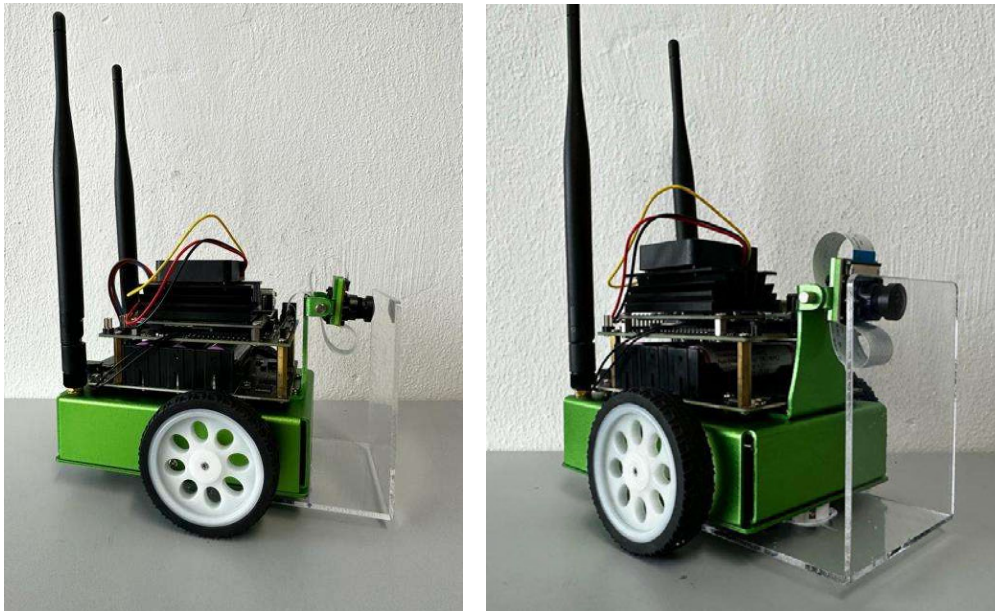


Abbildung 29: Jetbot mit montiertem Acrylwinkel vor der Kamera

Die mechanischen Vorbereitungen sind somit abgeschlossen und der Roboter kann mit den verschiedenen Verschmutzungen beaufschlagt werden. Bevor mit Versuchen gestartet werden kann, muss die Software des Roboters noch auf Objektvermeidung trainiert werden. Dies wird im folgenden Kapitel der Versuchsdurchführung näher erläutert.

## Training der KI-Bilderverarbeitung des Jetbot

Um sicherzustellen, dass der Jetbot Objekten ausweichen und sich selbstständig durch einen Parcours bewegen kann, muss er speziell für diese Aufgabe angepasst werden. Als KI-basierter Roboter ist dies im wahrsten Sinne des Wortes ein Lernprozess. Man spricht hierbei vom Training oder auch Data Collection. Dieser Prozess ähnelt prinzipiell dem Lernprozess eines Menschen. In diesem Fall muss der KI beigebracht werden was ein freier Fahrweg bzw. ein blockierter Fahrweg ist. Im Anschluss soll die Software aufgrund der gelernten Daten verstehen und eigenständig entscheiden, ob ein Fahrweg blockiert ist oder ob nicht ausgewichen werden muss. Es ist ebenfalls wichtig zu erwähnen, dass der Roboter nicht auf das kleinste Detail trainiert werden soll. Die KI- Software soll anhand der gegebenen Beispiele auch mit ähnlichen Situationen umgehen können, auch wenn diese nicht eins zu eins dem Trainingsset entsprechen. Man spricht in solch einem Fall von Over-Fitting. Also dem zu detaillierten anpassen. Für das erfolgreiche Training sind insgesamt drei Schritte erforderlich.

Im ersten Schritt werden die Trainingsdaten gesammelt und somit ein Datenset erstellt. Dazu gibt es in der JupyterLab Oberfläche, über die sich der Jetbot bequem vom Desktop- PC aus steuern lässt, eine Kategorie `data_collection.ipynb`. Darüber werden Bilder von der Kamera des Jetbot aufgenommen und als „frei“ oder „blockiert“ manuell im Speicher des Roboters abgelegt, vgl. Abbildung 30.

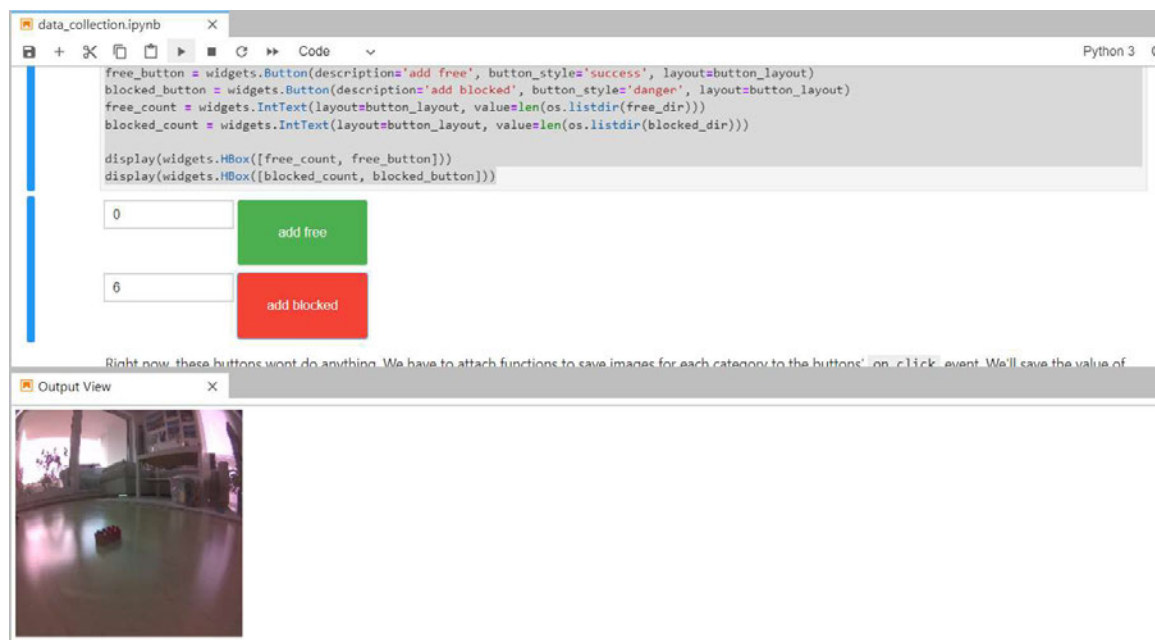


Abbildung 30: Oberfläche zur Datensammlung von Objekten am Jetbot

Nvidia empfiehlt jeweils 100 Beispielbilder für jede Kategorie aufzunehmen. Dabei ist es wichtig, die Objekte aus unterschiedlichen Winkeln und Situationen aufzunehmen. Auch Beispiele bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen helfen das System robuster zu machen. Da in dieser Arbeit das System auch mit Verschmutzung klarkommen muss, wird hier noch einiges mehr an Daten und Beispielbildern benötigt. So werden weitere Bilder auch mit verschmutzter Kamera aufgenommen. Insgesamt wurden jeweils 325 Beispiele für „blockiert“ und 287 Beispiele für „frei“ aufgenommen. Als Objekte dienten in diesem Fall unterschiedlichste Modellautos in verschiedenen Größen und Farben, sowie Lego Duplo® Bausteine in den Farben rot, grün, blau und gelb. Es ist irrelevant welche Beispiele als Blockade genommen werden. In der Abbildung 31 sind Beispiele aus dem Trainingsset dargestellt. Die Aufnahme der ersten Referenzbilder von Objekten wurde bereits mit einem Acrylwinkel und Verschmutzungsstufe 0 durchgeführt. Um dem System auch Beispielbilder mit Verschmutzung anzutrainieren, wurden zusätzlich die gleichen Objekte mit unterschiedlichen Verschmutzungsklassen (0 bis 5) aufgenommen.



Abbildung 31: Beispielbilder aus dem Trainingsset des Jetbot

Im zweiten Schritt wird das eigentliche neuronale Netz trainiert. Dazu wird der aufgenommene Datensatz zu jeweils 50 % in einen Trainings- und Validierungsdatsatz aufgeteilt. Das auf dem Jetbot verwendete neuronale Netz ist ein AlexNet, welches in Kapitel 2.2.1 genauer beschrieben ist. Dieses AlexNet läuft lokal auf der GPU des Jetbot. Um die genauesten Ergebnisse zu erzielen, wird der gesamte Datensatz 30-mal durchlaufen. Jeder Durchlauf entspricht einer Epoche. Dies nimmt bei der vorliegenden Datenmenge ungefähr 20 Minuten in Anspruch. Anschließend wird die Genauigkeit jeder Epoche verglichen und das genaueste Modell in der `best_model.pth` Datei lokal abgespeichert. Die Resultate der Genauigkeit jeder Epoche werden als Output ausgegeben, siehe hierzu Zusammenfassung in Tabelle 6. Die Genauigkeit 1, entspricht 100 %.

Tabelle 6: Resultate der Epochen nach dem AlexNet Datentraining

Epoche	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Genauigkeit	0.96	0.98	0.98	1	0.98	0.98	1	1	1	1	0.98	0.98	0.98	1	0.98	0.98

Epoche	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Genauigkeit	0.98	0.98	1	1	0.98	1	1	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	1

Im dritten Schritt wird das trainierte Modell, `best_model.pth`, auf den Jetbot aufgespielt und sämtliche Bewegungsparameter eingestellt (Geschwindigkeit, Bewegungsrichtung etc.). Hierzu müssen einige Softwareanteile gestartet werden, um das Modell auf die GPU des Jetbots laden und starten zu können. Sobald das Bildverarbeitungsprogramm gestartet wurde, besteht die Möglichkeit, sich die aktuell errechnete Blockadewahrscheinlichkeit des Systems, sowie das Live-Kamerabild anzeigen zu lassen, siehe hierzu Abbildung 32. In den Bewegungsparametern werden vergleichsweise simple Annahmen programmiert. Bei einer Blockadewahrscheinlichkeit von mehr als 80 % soll der Roboter nach links abbiegen und so dem Hindernis ausweichen. Die Geschwindigkeit des Roboters lässt sich über einen Schieberegler in der Bedienoberfläche steuern und auch in Echtzeit verändern. Sind all diese Parameter vergeben und eingestellt, lässt sich der Jetbot in Bewegung setzen. Damit sind alle Vorbereitungen abgeschlossen und es kann mit den eigentlichen Einfluss-Tests mit und ohne Verschmutzung begonnen werden.

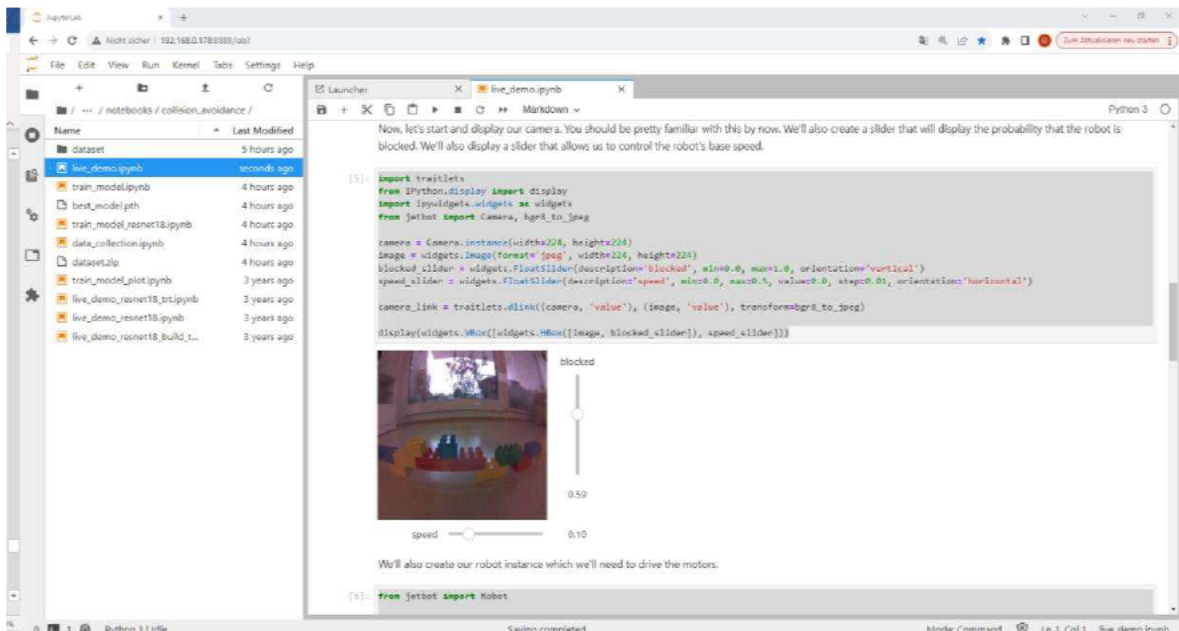


Abbildung 32: Ausgabe der Wahrscheinlichkeit einer bevorstehenden Blockade des Jetbot

## 3.2 Versuchsdurchführung

### Bilden von Verschmutzungsklassen:

Ein Vorbild hierfür ist die bereits unter 2.4.1 beschriebene Regelung UN 45, die sich auf die Prüfung von Scheinwerfer-Reinigungsanlagen bezieht. Hierbei werden Schichten mit genormtem Prüfschmutz auf die Scheinwerfer aufgetragen und die Lichtstärke, die noch hindurch dringen kann, mit einem Luxmeter gemessen. Das Ziel besteht darin, die Methodik für diese Arbeit so zu ändern, dass einfach und reproduzierbare Verschmutzungsklassen erstellt werden. Diese sollen vergleichbare Bedingungen für die Kameraverschmutzung simulieren. Als Hauptelement dieses Versuches wird der Normschmutz KSL-570 der Firma KSL Staubtechnik verwendet, der mir im Rahmen dieser Arbeit dankenswerterweise zur Verfügung gestellt wurde. Die Methodik ist von der Staubart unabhängig. Dieser Staub besteht aus 80 % Prüfstaub nach ECE R45 (Prüfstaub für Scheinwerfer), welcher aus Siliziumsand, Kohlenstaub sowie Natriumchlorid besteht. Besonderheit ist ein zusätzlicher 20-prozentiger Anteil an Volleipulver. Ziel soll es sein, Schichten dieses Staubes gleichmäßig auf die Acrylwinkel aufzutragen bzw. die Schichtanzahl gleichmäßig zu erhöhen und so die gewünschten Klassen zu erhalten. Durch den Auftrag auf Acrylwinkel, können diese sehr leicht vor die Kamera des Roboters montiert bzw. ausgetauscht werden. Insgesamt werden sechs dieser Winkel für diesen Versuch vorbereitet.

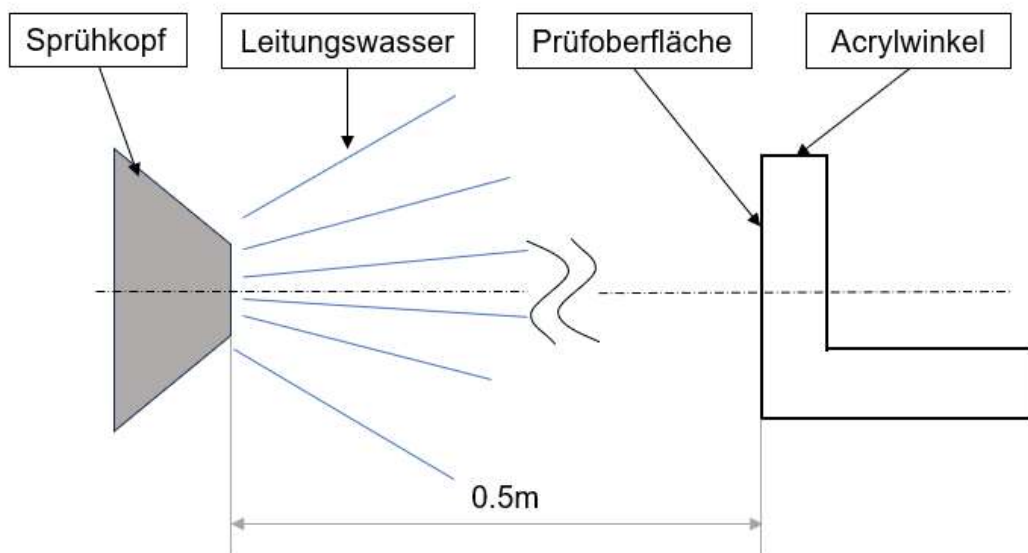


Abbildung 33: zerstäubende Wasseraufbringung auf Prüfoberfläche



Das Aufbringen der Verschmutzung erfolgt gemäß folgendem Verfahren:

- a) Entfetten und reinigen der Prüfoberfläche des Acrylwinkels mit Isopropanol.
- b) Zerstäubendes Aufsprühen aus 0,5m Entfernung von Leitungswasser auf die gereinigte Acryloberfläche, sodass ein dünner, möglichst durchgängiger Feuchtigkeitsfilm entsteht, siehe hierzu Abbildung 33. Zum Abgeben des Sprühstoßes wird eine Sprühflasche der Marke Gloria Hobby 05 genutzt. Sie eignet sich besonders, da sie erst beim Loslassen des Hebels zu sprühen anfängt, und so gleichmäßige Wassermengen verteilt. Es wird jeweils ein Sprühstoß abgegeben.
- c) Prüfstaub trocken mit einem 150 µm Sieb nach DIN ISO 3310-1 aufklopfen, vergleiche hierzu Abbildung 34.

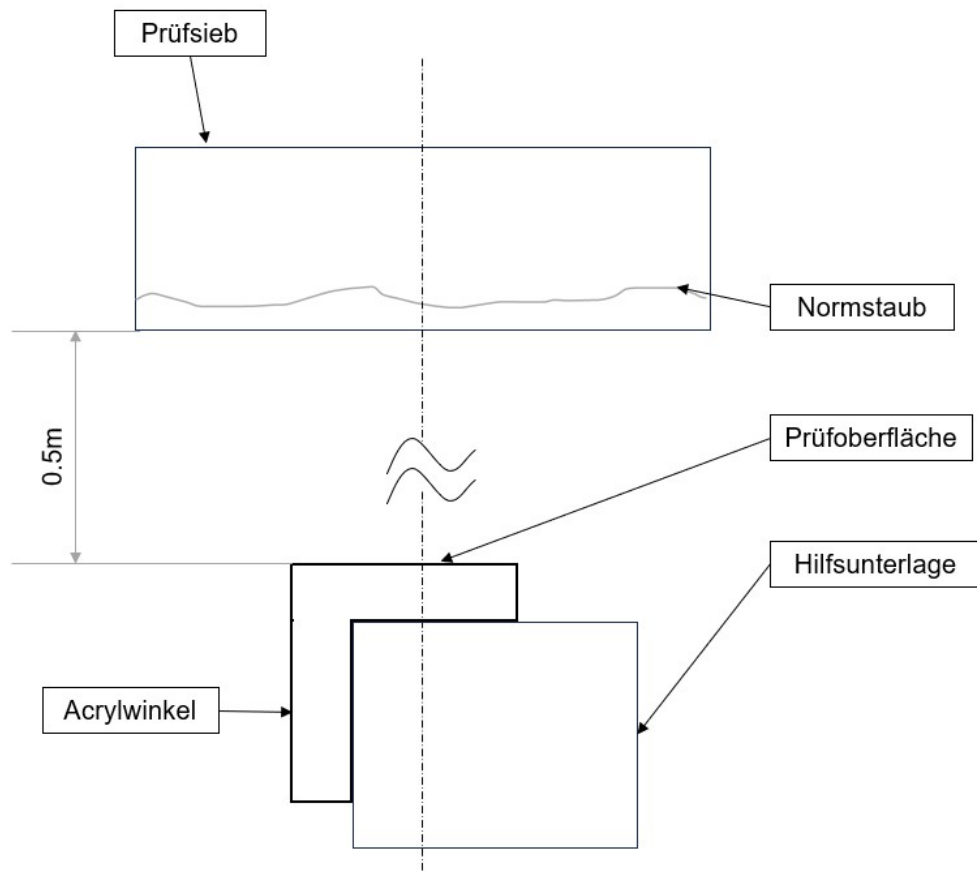


Abbildung 34: Aufbringung des Prüfstaubes

- d) Die Acrylplatte aufstellen, damit überschüssiger Staub abfällt.
- e) Einen weiteren Sprühstoß aus 0,5m Entfernung auf die Platte aufsprühen.

- f) Ungefähr eine Stunde lang trocknen lassen.
- g) Vorgang für jede weitere Verschmutzungsstufe ab Schritt 2 wiederholen. Die Platte Nr. 2 bekommt somit zwei Verschmutzungsschichten, die Platte Nr. 3 somit drei. Die am meisten verschmutzte Platte ist Platte Nr. 5.

In Abbildung 35 ist das unter Punkt c) erwähnte Prüfsieb dargestellt. Durch die genormte Maschenweite lassen sich gleichmäßige Staubschichten erzeugen.



Abbildung 35: 150 µm Prüfsieb zum gleichmäßigen Aufklopfen von Prüfstaub

Aus Abbildung 36 geht das Ergebnis der beschriebenen Verschmutzungsmethodik hervor. Es ist sehr deutlich die konstante Zunahme der Verschmutzung mit jeder weiteren Schmutzschicht erkennbar. Der gleichmäßige homogene Auftrag ist gut umsetzbar.

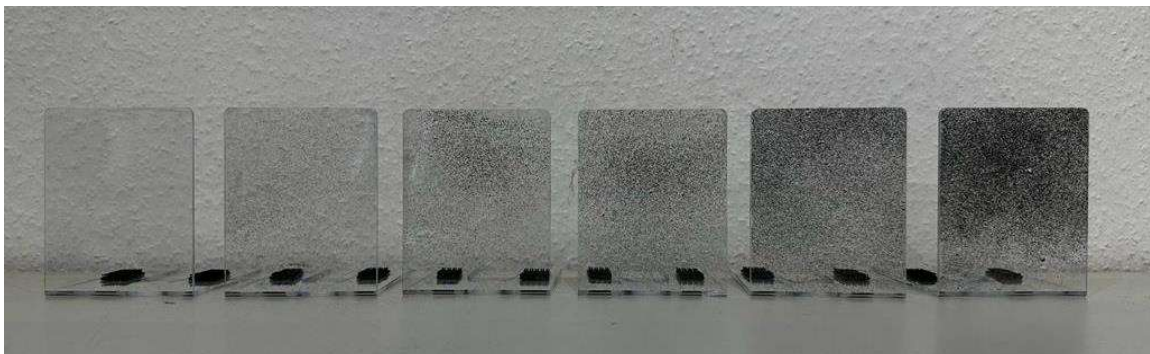


Abbildung 36: Vergleich aller Verschmutzungsstufen in aufsteigender Reihenfolge. links: Klasse 0, rechts: Klasse 5

Nachdem die Platten ungefähr eine Stunde getrocknet sind, lässt sich die Differenzen der Lichtdurchdringung zwischen den einzelnen Schichten messen. Als Referenzwert wird zur ersten Messung die unverschmutzte Platte genutzt (Klasse 0). Dazu wird diese auf ein Luxmeter gelegt. Der gemessene Wert entspricht 100 % durchdringende Lichtleistung für diesen Versuch. Im Anschluss wird die Platte mit der niedrigsten Verschmutzung, also einer einzelnen Verschmutzungsschicht an zwei Stellen gemessen, siehe hierzu Abbildung 37. Aus den beiden abgelesenen Werten wird der Mittelwert gebildet. Nun lässt sich die Reduktion der Lichtdurchlässigkeit in Prozent angeben.

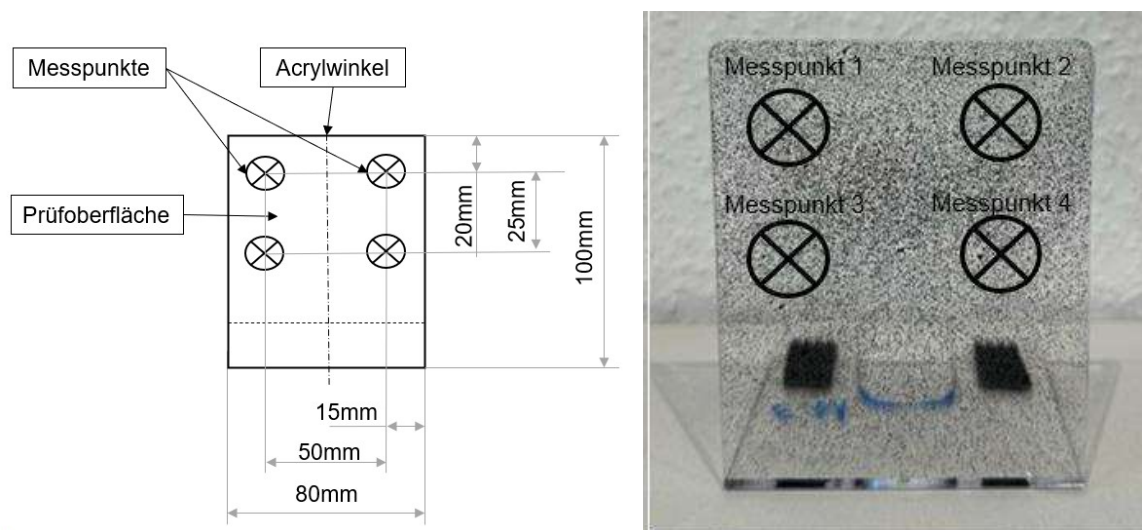


Abbildung 37: Messpunkte für die Lichtdurchlässigkeit an der Acrylplatte. Links: Skizze, Rechts: reales Versuchsobjekt

Das verwendete Luxmeter ist ein Lightmeter MT-912. Die angewandte Methode entspricht dem bereits zuvor genannten Vorbild der Scheinwerferreinigungsanlagenprüfung. Die genauen Messwerte (MW) lassen sich Tabelle 7 entnehmen. Im untenstehenden Diagramm lässt sich auch erkennen, dass die Abnahme der Durchlässigkeit mit jeder zusätzlichen Schicht fast linear verläuft.

Tabelle 7: Lichtdurchlässigkeitsmessung der Versuchsplatten

	Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
Schichten	0	1	2	3	4	5
MW Punkt 1 [lux]	1344	1200	922	766	655	325
MW Punkt 2 [lux]	1351	1230	912	790	622	360
MW Punkt 3 [lux]	1362	1259	908	778	650	348
MW Punkt 4 [lux]	1339	1222	937	796	638	310
Durchschn. [lux]	1349.0	1227.8	919.8	782.5	641.3	335.8
Angabe in %	100.0	91.0	68.2	58.0	47.5	24.9

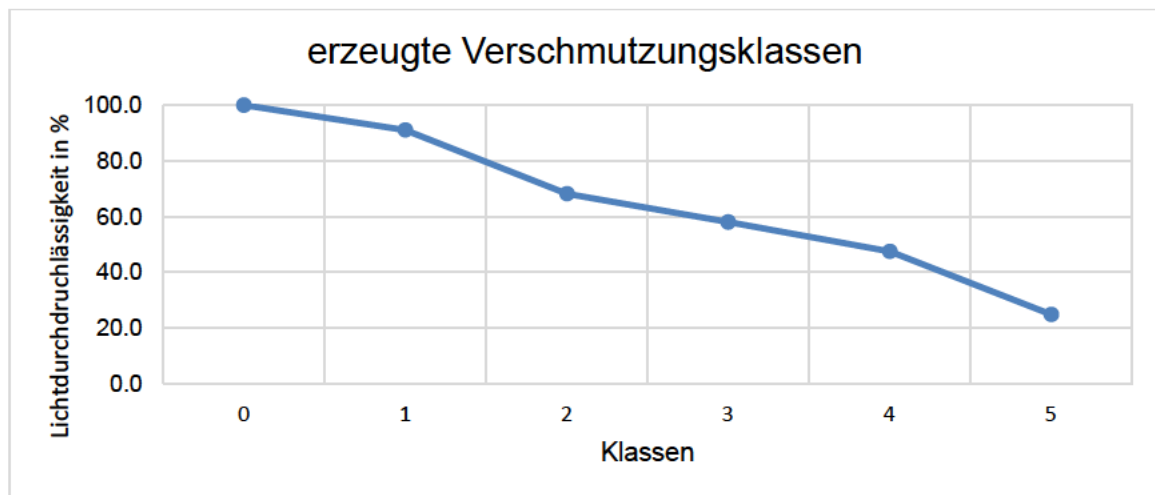


Abbildung 38: grafische Darstellung der erzeugten Verschmutzungsklassen

## Testparcours und Bewertungsparameter

Wie bereits in den Grundüberlegungen beschrieben, soll der Jetbot eigenständig und kollisionsfrei einen Parcours durchfahren, auf dem sich unterschiedliche Objekte befinden. Der geplante Parcours ist in Abbildung 39 dargestellt. Darin werden unterschiedliche Objekte zufällig auf einer Fläche von 2,7 m x 2 m platziert. In der Trainingsphase wurden dem System der Großteil der Objekte beigebracht. Zusätzlich sind auch Objekte enthalten, die im Datensatz nicht vorhanden waren.

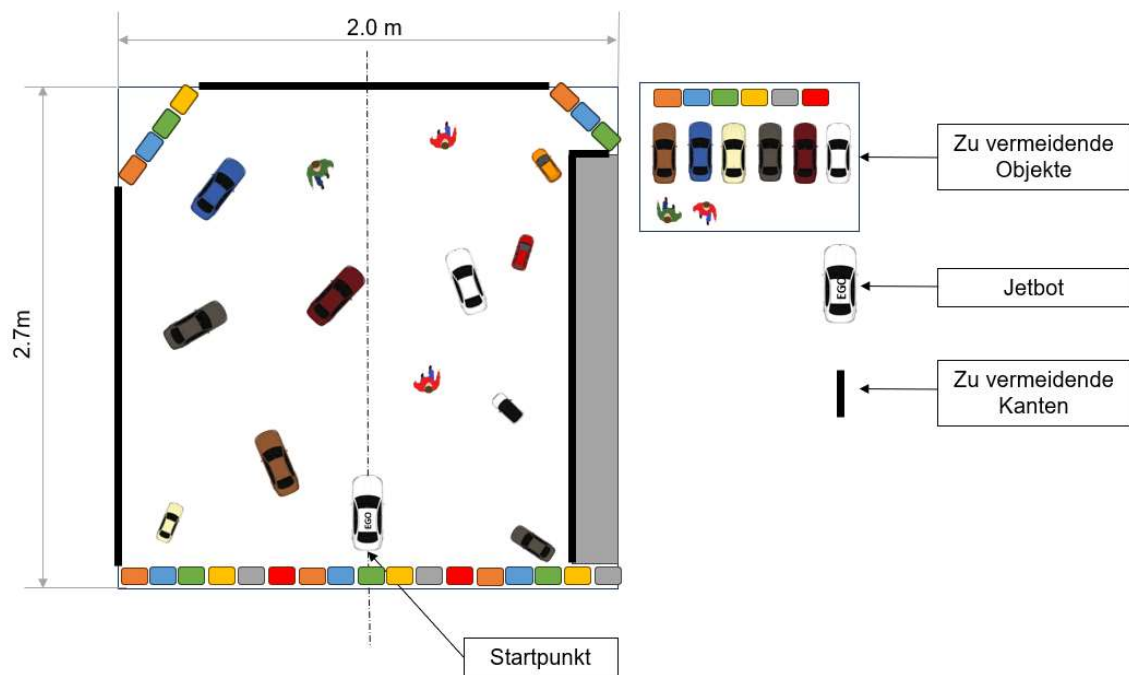


Abbildung 39: Testparcours Layout

Mit jeder Verschmutzungsstufe soll der Roboter 15 Minuten durch den Parcours fahren. Für eine bessere visuelle Vergleichbarkeit der Schmutzbelastung werden außerdem Kamerabilder des Jetbots vor einem Referenzobjekt heruntergeladen und dokumentiert.

Zu den auszuwertenden Bewertungsparameter gehören:

- Anzahl der Kollisionen,
- ausgegebene Blockadewahrscheinlichkeit (mit und ohne Referenzobjekt),
- auffallende Änderungen im Fahrverhalten des Jetbots.

### Testfahrt ohne Verschmutzung

Um die Referenzperformance des Roboters einschätzen zu können, wird als erstes eine Testfahrt mit der Verschmutzungsstufe 0 durchgeführt, sowie die Kollisionswahrscheinlichkeit mit und ohne Referenzobjekt betrachtet, siehe hierzu Abbildung 40. Die Betrachtung dieser Referenzobjekte und der Ausgabe erfolgt im statisch unbewegten Roboterzustand.

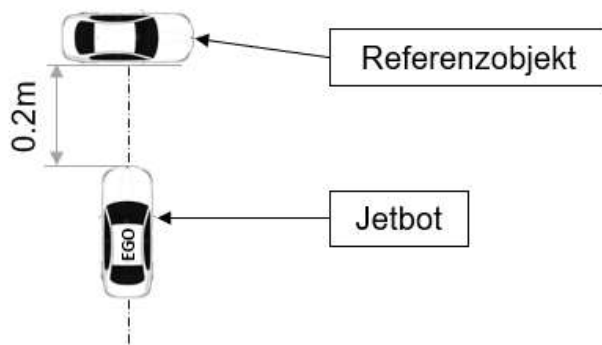


Abbildung 40: Layout der Betrachtung zur Kollisionswahrscheinlichkeit des Referenzobjektes

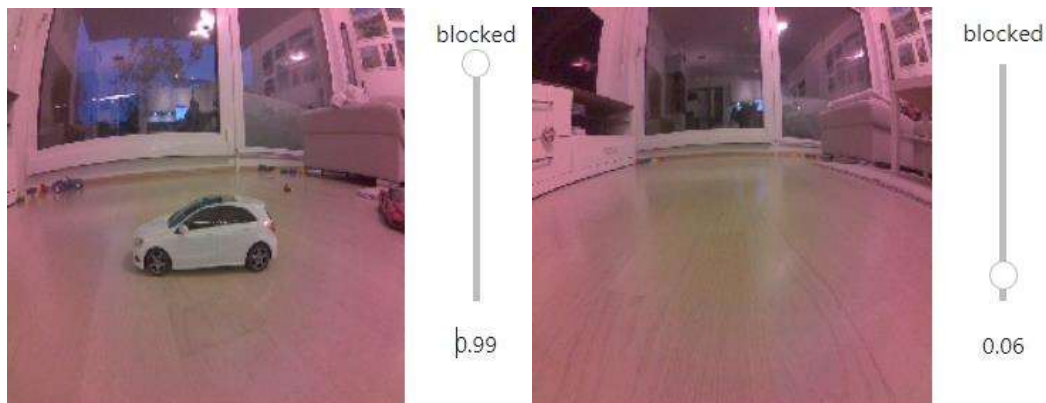


Abbildung 41: Kamerabilder mit Verschmutzungsstufe 0 mit und ohne Referenzobjekt, sowie Blockade-Wahrscheinlichkeit

Bereits in der statischen Betrachtung, ist es deutlich erkennbar, dass der Bildverarbeitungsalgorithmus eine präzise Lageeinschätzung liefert, vergleiche hierzu Abbildung 41. Auch im Fahrverhalten des Jetbots zeigt sich dies, indem er bei freier Fahrt eine Strecke geradeaus fährt und bei bevorstehender Kollision Hindernissen nach links ausweicht. Nach einer 15-minütigen Testfahrt hat der Roboter kein einziges Objekt touchiert oder berührt. Auch fährt der Roboter keine Kurven, wenn nichts den Fahrweg blockiert. Somit entspricht der Referenztest den erwarteten Ergebnissen.

### Testfahrten mit Verschmutzung

Bei den folgenden Testfahrten mit Verschmutzung durchläuft der Roboter denselben Parcours. Nach jeder 15-minütigen Fahrt wird eine neue Arcylscheibe, mit sich erhöhender Verschmutzung am Roboter montiert. Während der Fahrt wird darauf geachtet, ob am Roboter eine Veränderung im Fahrverhalten zu beobachten ist, oder ob der Roboter sogar mit Objekten kollidiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Zudem

werden die Blockadewahrscheinlichkeiten vor einem Referenzobjekt sowie die Blockadewahrscheinlichkeit bei freier Fahrt ausgewertet.

a) Verschmutzungsstufe 1

Bei dieser Verschmutzung konnte kein Effekt festgestellt werden. Der Roboter konnte die 15-minütige Fahrt ohne erkennbare Differenz zur Verschmutzungsstufe 0 absolvieren. Dies zeigt sich auch in den errechneten Blockadewahrscheinlichkeiten in den Referenzszenarios, siehe hierzu Abbildung 42. Die errechneten Werte entsprechen dem sicheren Fahrverhalten.

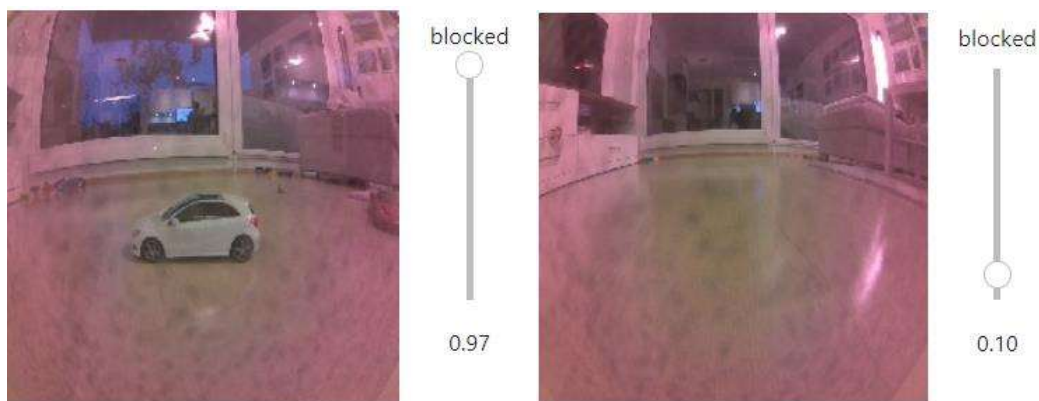


Abbildung 42: Kamerabilder mit Verschmutzungsstufe 1 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit

b) Verschmutzungsstufe 2

Hierbei konnte ein minimaler Einfluss der Verschmutzung beobachtet werden. Der Roboter wirkt auf seiner Testfahrt etwas unsicherer als gegenüber den Klassen 0 und 1. Allerdings bewältigt er die Testfahrt ohne Kollision. Zudem lässt sich beobachten, dass die Blockadewahrscheinlichkeit unsicherere Werte liefert. Speziell der Wert für die nicht blockierte Fahrt, ist mit 55 % Blockadewahrscheinlichkeit im Vergleich zur Klasse 1 vergleichsweise hoch, siehe hierzu Abbildung 43.

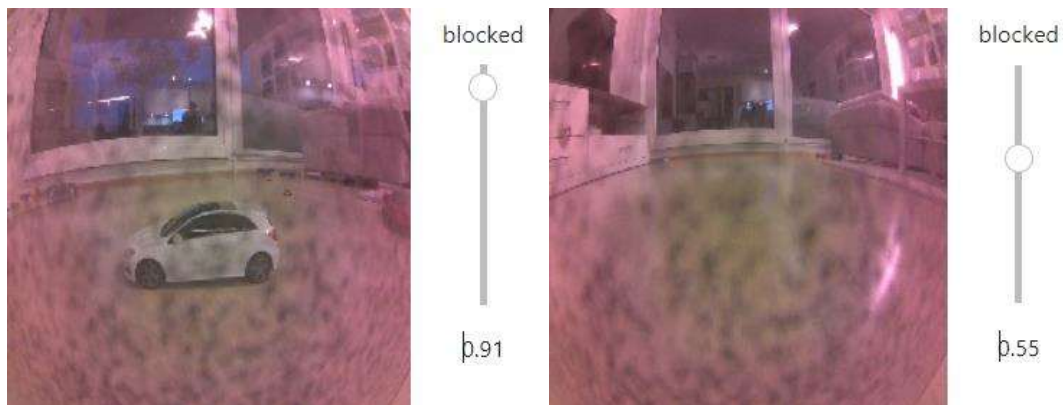


Abbildung 43: Kamerabilder mit Verschmutzungsklasse 2 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit

### c) Verschmutzungsklasse 3

Der im vorherigen Experiment beobachtete kleine Effekt der Verschmutzung, ist mit dieser Verschmutzungsklasse verstärkt zu beobachten. Der Roboter wirkt noch unsicherer als zuvor, auch biegt er 8-mal fälschlicherweise nach links ab, obwohl der Fahrweg frei wäre. Die Blockadewahrscheinlichkeit lag somit bei mehr als 80 %. Tatsächlichen Hindernissen weicht der Jetbot allerdings noch zuverlässig aus. Dies spiegelt sich auch in den errechneten Blockadewahrscheinlichkeiten wider, siehe hierzu Abbildung 44. Speziell der Messwert für freie-Fahrt ist deutlich höher und befindet sich im Mittel bei annähernd 80 %.

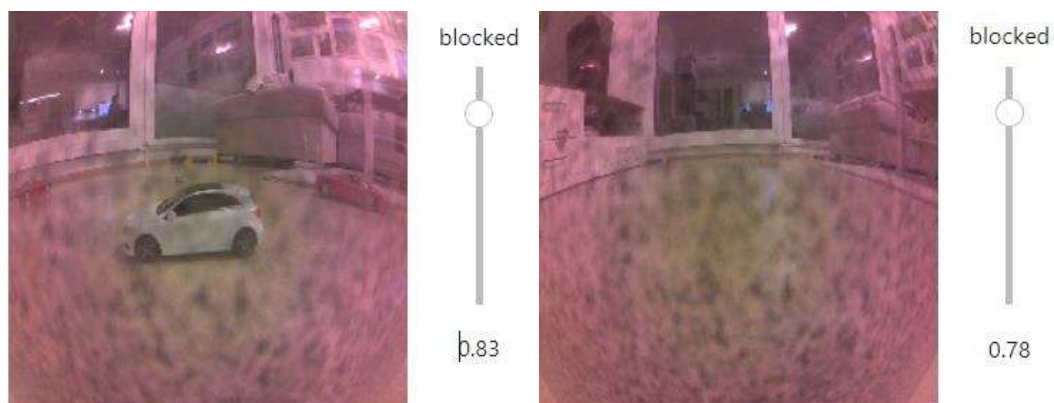


Abbildung 44: Kamerabilder mit Verschmutzungsklasse 3 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit



## d) Verschmutzungsstufe 4

Mit dieser Verschmutzung scheint das Limit des Roboters erreicht. Das Ausweichen von Objekten ist nicht mehr zuverlässig gewährleistet. In der 15-minütigen Fahrt kollidiert der Jetbot insgesamt 2-mal mit einem Objekt im Parcours. Zudem biegt er fast auf jeder freien Strecke falsch nach links ab. Die errechnete Wahrscheinlichkeit einer Blockade liegt bei konstant mehr als 80 %. Dies kann nicht mehr als kontrolliertes Fahrverhalten gewertet werden. Eindeutig sichtbar wird dies zudem in der Auswertung der Blockadewahrscheinlichkeit, vgl. Abbildung 45.

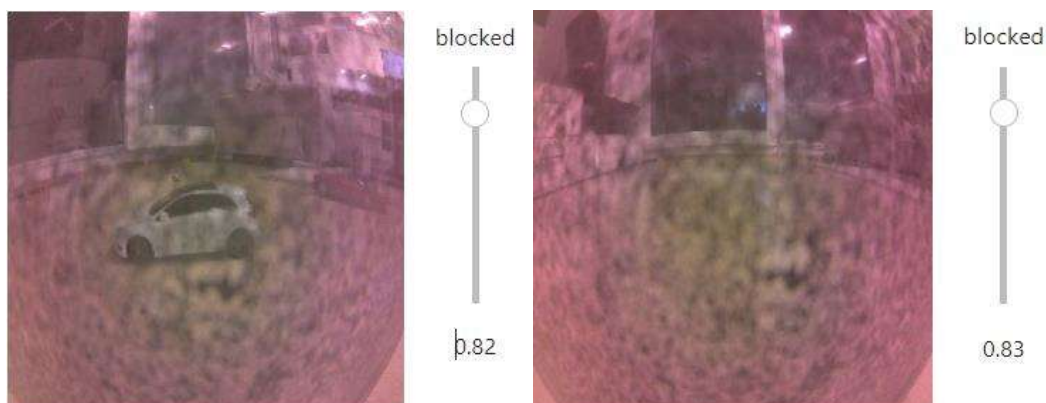


Abbildung 45: Kamerabilder mit Verschmutzungsstufe 4 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit

## e) Verschmutzungsstufe 5

Hierbei wird noch verstärkter sichtbar, dass die Leistungsgrenze des Roboters überschritten wurde. Die Objekte im Parcours werden nicht mehr zuverlässig erkannt und permanente Kollisionen sind die Folge. Auch sind keine Freifahrten mehr möglich bzw. erkennbar. Der Jetbot fährt fast durchgängig nach links und somit im Kreis. Die Blockadewahrscheinlichkeit liegt nun permanent über 80 % hin. Bestätigt wird dies bei der Auswertung der errechneten Blockadewahrscheinlichkeiten. Da diese konstant hoch sind, ist davon auszugehen, dass der Roboter nicht mehr zwischen freier Fahrt oder blockierter Fahrt unterscheiden kann, siehe hierzu Abbildung 46.

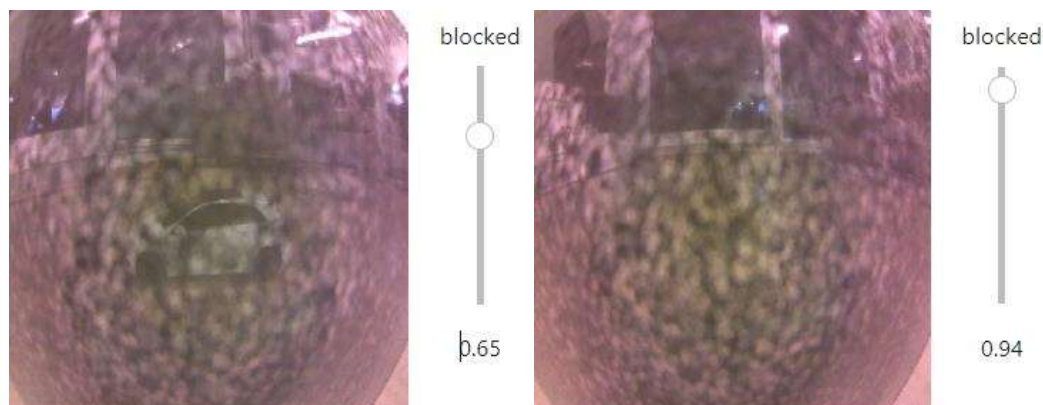


Abbildung 46: Kamerabilder mit Verschmutzungsklasse 5 mit und ohne Referenzobjekt, inklusive zugehöriger Blockadewahrscheinlichkeit

### 3.3 Auswertung der Ergebnisse

Das wichtigste Kriterium für die Auswertung ist die einfache Anwendbarkeit der Methodik und die Feststellung eines Verschmutzungseffekts in Abhängigkeit von der Erkennungsleistung. Da die Methode auf jedes kamerabasierte FAS angewendet werden kann, ist die eigentliche Erkennungsleistung davon unabhängig. Die Methode dient lediglich der Feststellung, wann ein Effekt auftritt und welcher Verschmutzungsklasse er zuzuordnen ist. Durch die Anwendung dieser Technik können Prüfbehörden künftig hochautomatisierte kamerabasierte Systeme auf ihre Robustheit überprüfen und Verschmutzungseffekte erkennen. Zur Analyse der Verschmutzungseffekte steht beim Jetbot nur das Fahrverhalten zur Verfügung. Um den Effekt quantitativ zu untermauern, bietet der Jetbot die Möglichkeit die Blockadewahrscheinlichkeit auszugeben und für dessen Analyse zu nutzen. Es ist anzunehmen, dass den Systemherstellern in der Praxis eine Vielzahl weiterer Parameter zur Auswertung zur Verfügung stehen, die vom System ausgegeben werden. Für das Ergebnis sind diese Parameter jedoch irrelevant, wie zuvor beschrieben. Die Blockade-Wahrscheinlichkeit wird in zwei sich wiederholenden Szenarien abgelesen und bei jeder Verschmutzungsklasse wiederholt. Zunächst wird ein Referenzobjekt, ein weißes Modellauto, vor den Jetbot gestellt und der Wert wird abgenommen, siehe Abbildung 40. Im zweiten Szenario wird das Referenzobjekt entfernt und der Wert erneut abgelesen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammenfassend für alle durchgeführten Tests aus 3.2 dargestellt.

Tabelle 8: Ergebnisse der Versuchsfahrten in Abhängigkeit der Verschmutzungsstufe

Verschmutzungsstufen	Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
Fahrzeit [min]	15	15	15	15	15	15
Kollisionen	0	0	0	0	2	8
Wahrscheinlichkeit Blockade: Referenzmodell	99 %	97 %	91 %	83 %	82 %	65 %
Wahrscheinlichkeit Blockade: Freie Fahrt	6 %	10 %	55 %	78 %	83 %	98 %
Einfluss auf Fahrverhalten	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja

Bei Betrachtung der Ergebnisse aus Tabelle 8 zeichnet sich ein klarer Trend ab. Mit steigender Verschmutzungsstufe, reduziert sich die Zuverlässigkeit der Messwerte sowie das gesamte Fahrverhalten. Die Blockadewahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Verschmutzungsstufe 0 bis 2 entsprechen den zu erwartenden Ergebnissen und liefern korrekte Werte. In Klasse 2 zeigt sich jedoch, dass der Blockadewahrscheinlichkeitswert für die freie Fahrt sich bereits deutlich in die ungenaue Richtung verschiebt. Der Wert steigt gegenüber der Klasse 1 um 45% an. Da die Blockadewahrscheinlichkeit jedoch noch unter den kritischen Werten von 80 % bleibt, ist das Fahrverhalten nicht von den anderen Klassen zu unterscheiden. Ab der Klasse 3 wird der beobachtete Effekt aus Klasse 2 nochmals verstärkt. Es ist erkennbar, wie die Blockadewahrscheinlichkeit für freie Fahrt immer unzuverlässiger wird. Der Roboter fährt fälschlicherweise nach links, auch wenn kein Hindernis vorhanden ist. Auch pendelt der Messwert bei der Blockade durch das Referenzmodell um die 80 %. Es ist anzunehmen, dass dies aus der Kombination von tatsächlicher Blockade und der Sichteinschränkung der Verschmutzung geschieht. Ab der Klasse 4 sind erste Kollisionen zu verzeichnen sowie ein nicht mehr vorhersehbares Fahrverhalten. Ab der Klasse 5 fährt der Jetbot nahezu unkontrolliert nur noch gegen den Uhrzeigersinn im Kreis. Die Bildverarbeitung kann somit nicht mehr zwischen freier Fahrt und Blockade unterscheiden. Durch die Betrachtung über alle Klassen, lässt sich hier gut beobachten, dass die Klasse 2 für den Jetbot eine kritische Schwelle ist. Würde es sich hier um ein kamerabasiertes FAS System in einem Pkw handeln, könnte es gerade noch zuverlässig betrieben werden. Dies ist insofern erstaunlich, da die Klasse 2 lediglich knapp 32 % Lichtdurchlässigkeitsverlust gegenüber der Klasse 0 besitzt, siehe hierzu Darstellungen in Tabelle 7. Ab der Klasse 3 wäre ein sicherer Betrieb nicht mehr möglich. Die Detektionsergebnisse werden zu ungenau. Würde es sich dabei um ein Fahrzeug handeln, welches im Straßenverkehr unterwegs ist, ist ein Unfall wahrscheinlich. Durch Anwendung der entwickelten Methodik konnte ein vergleichbarer und reproduzierbarer

Zusammenhang zwischen Verschmutzung und Erkennungsleistung der Kamera hergestellt werden. Es lässt sich somit feststellen, ab welchem Punkt das System in Abhängigkeit von Verschmutzungsklassen an seine Leistungsgrenze stößt. Die generierten Verschmutzungsklassen liefern eine klare Information, auch ohne die Auswertung der Blockadewahrscheinlichkeit. Es genügt, in diesem speziellen Fall, das Fahrverhalten zu betrachten.

Um die gewonnenen Erkenntnisse für eine Prüfbehörde, die künftig autonome Fahrsysteme überprüft und genehmigt, anwendbar zu machen, müssten einige Anpassungen vorgenommen werden. Die folgenden Punkte erläutern zusätzliche Erweiterungen, die aufgrund des Umfangs dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden konnten:

a) Erweiterte Bewertungskriterien im Fahrverhalten

Um ein kamerabasiertes FAS im realen Straßenverkehr bewerten zu können, müssen bereits bei unverschmutzten Sensoren eine Vielzahl von Tests durchgeführt werden. Sämtliche Vorgaben vom Gesetzgeber müssen erfüllt werden, bevor sie an den Endnutzer gelangen. Zur Überprüfung der Verschmutzungsresistenz sind mehr Merkmale sowie länger andauernde Versuche notwendig. Eine definierte Referenzstrecke mit allen in der ODD enthaltenen Szenarien kann eine Alternative sein. Es ist gleichgültig, ob diese Referenzstrecke auf einem Prüfgelände oder im realen Straßenverkehr (mit Sicherheitsfahrer) stattfindet. Es muss reproduzierbar sein und die jeweiligen rechtlichen Vorgaben müssen eingehalten werden. Nach Aufbringung der Verschmutzungsklassen kann die Referenzroute abgefahren werden, um eventuelle Veränderungen im Fahrverhalten zu erkennen. Das System muss stets die geforderte Sicherheit und Fahrperformance erreichen, die der Gesetzgeber vorschreibt. Nach Abschluss der Testfahrten könnte die Prüfbehörde beispielsweise eine Verschmutzungsresistenz bis Klasse 3 bescheinigen. Der Hersteller des SDS-Systems müsste lediglich sicherstellen, dass der betroffene Sensor gereinigt wird, sobald dieser Verschmutzungsgrad erreicht ist. Alternativ sollte das Fahrzeug in einen sicheren Zustand überführt werden, beispielsweise durch Anhalten oder andere minimale Risikomanöver.

b) Schnelligkeit der Verschmutzungserkennung

Es ist möglich, dass eine Verschmutzung des Sensors nicht nur kontinuierlich während der Fahrt auftritt, sondern auch spontan durch Ereignisse wie Schwallwasser, Vogelkot oder Vandalismus entstehen kann. Eine schnelle Erkennung und Umsetzung geeigneter Maßnahmen sind daher entscheidend. Der zeitliche Faktor wie schnell eine Sichtbeeinträchtigung am Sensor erkannt wird, sollte daher auch in die Regelung für eine

Prüfbehörde einbezogen werden. Beispielsweise könnten Sensoren vollständig verdeckt werden und die anschließende Reaktionszeit des Gesamtsystems betrachtet werden.

c) Kombination von Verschmutzung und anderen Sichteinschränkungen

Verschmutzung durch Prüfstaub stellt für kamerabasierte Sensoren, wie bereits in dieser Arbeit festgestellt, ein erhebliches Risiko dar. In diesem Fall kann die Umgebung nicht mehr so zuverlässig erkannt werden, um sicher zu manövrieren. Unter realen Bedingungen können diese Verschmutzungen zusätzlich durch andere Faktoren verstärkt werden. Unter anderem ist hier die Blendung von niedrigstehender Sonne, aber auch anderen Fahrzeugen zu erwähnen. Auch Dunkelheit oder rasch wechselnde Lichtverhältnisse sind weitere Katalysatoren dieses Problems. Es ist daher sinnvoll, ein kamerabasiertes FAS, auch gegen solche Kombinationen zu prüfen. Beispielsweise kann eine Klasse 3 Verschmutzung mit der Blendung eines entgegenkommenden Fahrzeugs durch Fernlicht simuliert werden.

d) Erweiterung für zusätzliche Sensorarten

Vollautonome Fahrzeuge fahren nicht nur mit Kameras. Sie erfassen ihre Umgebung mit einer Vielzahl von Sensoren. Diese zusätzliche Sensorik wird meist durch Radar, LiDAR oder auch Ultraschalltechnologie abgebildet. Die Anwendbarkeit der Verschmutzungsmethodik, wie sie in dieser Arbeit generiert wurde, wäre nicht 1:1 auf diese Arten übertragbar. Jeder Sensortyp reagiert anders auf Verschmutzung und muss daher separat betrachtet werden. Der Ansatz Verschmutzung in Klassen einzuteilen ist davon unabhängig.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Kamerasysteme im Pkw übernehmen immer komplexere Aufgaben wie beispielsweise für Parkfunktionen, Notbrems- und Spurhaltefunktionen oder auch zur Steuerung des Infotainments. Im Bereich der autonomen Fahrzeuge sind sie bereits unverzichtbar geworden. Kameras sind im Vergleich zu anderen Sensorsystemen kostengünstig, kompakt und können an nahezu jede Situation angepasst werden. Der Einsatz von künstlicher Intelligenz in der Erkennungsalgorithmik macht sie präziser und zuverlässiger denn je zuvor. Die Literaturrecherche hat ergeben, dass keine standardisierten Methoden existieren, um die Verschmutzungsresistenz solcher Systeme im FAS-Bereich zu prüfen. Gerade bei fahrerlosen Systemen, wo Kameras vergleichbar mit menschlichen Augen funktionieren, stellt dies eine kritische Lücke dar. Dass das Problem der Verschmutzung kein neues ist, wird zum Beispiel durch die erforderlichen gesetzlichen Prüfungen von Reinigungseinrichtungen an Scheinwerfern und der Frontscheibe verdeutlicht. Aus diesem Grund war es naheliegend auf diesem Testkonzept aufzubauen. Die Ausarbeitung und Testung einer Prüfmethode zur Verschmutzungsresistenz stellt den Fokus dieser Arbeit dar. Im Vordergrund standen eine einfache Anwendung, reproduzierbare und zuverlässige Ergebnisse sowie die Entwicklung einer kameratyp-unabhängigen Methode. Ein Hauptproblem bestand darin, vergleichbare Verschmutzungsklassen zu definieren. Mit Hilfe genormter Prüfstaubpartikel, die speziell für Sensorik am Pkw entwickelt wurden, konnte eine Methode erarbeitet werden. Die verschiedenen Klassen bestanden am Ende aus zunehmenden Schichten von Schmutz, die auf Acrylkunststoffplatten aufgebracht wurden. Die Schwierigkeit liegt darin, dass durch den definierten Auftrag des Schmutzes mittels eines genormten Siebs dieser direkt auf die Kamera oder die Frontscheibe, welche hinter der die Kamera sitzt, aufgetragen werden kann. Das direkte Aufsprühen eines Wasser-Schmutz Gemisches erwies sich als unzureichend, da kein gleichmäßiger Auftrag gewährleistet werden konnte. Nach Trocknung des Auftrags konnte der Grad der Verschmutzung mittels Lux-Messung der Lichtdurchdringung quantitativ ermittelt werden. Danach musste ein passendes Testobjekt gefunden werden, für das sich der kamerabasierte KI-Roboter Jetbot besonders eignete. Dieser modulare Baukasten kann für nahezu jede Anwendung trainiert werden. Nachdem insgesamt 612 Bilder mit und ohne Verschmutzung trainiert wurden, konnte die Theorie in einer praktischen Anwendung umgesetzt werden. Die Ergebnisse haben bestätigt, dass die Methode erfolgreich ist. Es war eindeutig zu ermitteln, bei welchem Grad der Verschmutzung das System an seine Grenzen stößt. Somit konnte eine direkte Abhängigkeit zwischen der Verschmutzung und der Sensorleistung dargestellt werden.

Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse könnte man in Zukunft die Verschmutzungsklassen weiter verfeinern und auch für andere Sensorarten anwendbar machen. Auch

Kombinationen aus Versuchen mit Verschmutzung bei Nacht oder Dunkelheit sollten je nach Anwendungsgebiet des kamerabasierten Fahrerassistenzsystems oder des autonomen Systems durchgeführt werden. In diesen Fällen muss das Test-Set um den jeweiligen Anwendungsfall erweitert werden. Eine Adaption dieser Methode wäre für Prüfbehörden sinnvoll. Darüber hinaus wäre es möglich, die Verschmutzungsklassen als Muster auf Folien zu drucken. Dadurch könnte eine exakt definierte Verschmutzung auf Kameralinsen noch einfacher und schneller aufgebracht werden. Weitere Verschmutzungstests werden auf dem Weg zum autonomen Fahren unausweichlich sein. Insbesondere bei fahrerlosen Systemen ist es entscheidend, die Systemgrenzen zu kennen und zu überprüfen. Die in dieser Arbeit erarbeitete Methodik bietet dafür eine funktionsfähige Grundlage, um sicherzustellen, dass Kameras bis zu gewissen Verschmutzungen zuverlässig funktionieren. Reinigungssysteme werden zudem helfen, auch bei widrigen Bedingungen einen sicheren Betrieb zu garantieren.

## Literaturverzeichnis

---

- [1] Schulz, R.: Blickverhalten und Orientierung von Kraftfahrern auf Landstraßen. Technische Universität Dresden, 2012. Dissertation
- [2] [https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1\\_roadimpact.htm](https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1_roadimpact.htm), abgerufen am 09.07.2023
- [3] <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/neue-fahrzeugsicherheitssysteme.html>, abgerufen am 31.07.2023
- [4] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42018X1947&from=RO>, abgerufen am 31.07.2023
- [5] Heinzler, R.; Schnidler, P.; Seekircher, J.; Ritter, J.; Stork, W.: Weather Influence and Classification with Automotive Lidar Sensors. 4. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 9. -12.6.2019, S. 1527 - 1534.
- [6] <https://www.mobileye.com/solutions/mobility-as-a-service/>, abgerufen am 31.07.2023
- [7] <https://www.edge-ai-vision.com/2020/05/how-many-cameras-do-we-need-29-says-waymo/#:~:text=That's%20over%2040%20powerful%20sensors,the%20car%20to%20its%20destination.>, abgerufen am 31.07.2023
- [8] Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012. - ISBN 978-3-8348-8619-4.
- [9] Reif, K.: Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010. - ISBN 978-3-8348-9717-6
- [10] Proff, H.; Brand M.; Schramm D.: Altersgerechte Fahrerassistenzsysteme, Technische, psychologische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Springer Gabler, 2020. - ISBN 978-3-658-30870-4.
- [11] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1083873/umfrage/anteil-der-pkw-mit-fahrerassistenzsystemen-in-deutschland/>, abgerufen am 05.11.2023
- [12] Brown, I. D.: A review of the 'looked but failed to see' accident causation factor. Behavioural. Februar 2002  
research in road safety: Eleventh Seminar
- [13] Statistisches Bundesamt: Verkehr – Verkehrsunfälle 2021. Fachserie 8 Reihe 7, Destatis, 2022. - Art. -Nr. 2080700217004.



- 
- [14] Schramm, D.; Hesse, B.; Maas, N.; Unterreiner, M.: Fahrzeugtechnik. De Gruyter Oldenbourg, 2016. - ISBN 978-3-486-85514-2.
- [15] Winner, H.; Hakuli, S.; Lotz, F.; Singer, C.: Handbuch Fahrerassistenz ATZ/MTZ-Fachbuch. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. - ISBN 978-3-658-05734-3.
- [16] SAE, International: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles - J3016. Juni 2018.
- [17] Naab, K.: Sensorik- und Signalverarbeitungsarchitekturen für Fahrerassistenz und Aktive Sicherheit. 1. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme, 2004, S. 3 - 4.
- [18] Pischinger, S.; Seiffert, U.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 9. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021. - ISBN 978-3-658-25557-2.
- [19] Braess, H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2012. ISBN - 978-3-8348-8298-1.
- [20] Krizhevsky, A.; Ilya S.; Geoffrey, E. H.: ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Advances in neural information processing systems (2012).
- [21] Reichert, T.: Umweltsimulation und Produktqualifikation. Fraunhofer-Institut für chemische Technologie (2021), S. 4.
- [22] Eyerer, P.; Schüle, H.; Elsner, P.: Werkstoff- und Bauteilprüfung, Recycling, Entwicklung. 2. Aufl. Heidelberg: Springer Vieweg, 2020. - ISBN 978-3-662-59839-9
- [23] [https://www.ksl-staubtechnik.de/branchen\\_produkte/pruefstaub-teststaub/norm-staeube/](https://www.ksl-staubtechnik.de/branchen_produkte/pruefstaub-teststaub/norm-staeube/), abgerufen am 01.11.2023
- [24] Potthoff, J.: Untersuchung der Verschmutzung von Kraftfahrzeugen im Windkanal. Düsseldorf, VDI-Jahrestagung Fahrzeugtechnik, 1974.
- [25] Spruß, I.: Ein Beitrag zur Untersuchung der Kraftfahrzeugverschmutzung in Experiment und Simulation. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2016. - 978-3-658-13028-2.
- [26] Kolev, N.I.: Drag Lift and Virtual Mass forces. 2. Aufl. Berlin, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007. - ISBN 978-3-540-69835-7.
- [27] Vollmer, H.: Neue Methoden zur Analyse der Benetzung von Pkw -Seitenschreiben. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. - ISBN 978-3-658-22487-5.
- [28] Schütz, T.: Hucho - Aerodynamik des Automobils. 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013. - ISBN 978-3-8348-2316-8.
- [29] Stanton, D. W.; Rutland, C. J.: Multi-Dimensional Modeling of Heat and Mass Transfer of Fuel Films Resulting from Impinging Sprays. International Journal of Heat and Mass Transfer (1998) H.41, S. 3037 - 3054.

- 
- [30] Vollmer, H.: Neue Methoden zur Analyse der Benetzung von Pkw-Seitenscheiben. Aufl. 1. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018. - ISBN 978-3-658-22487-5.
- [31] Rudolph, H. J.: Audi Q3 Entwicklung und Technik. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013. - ISBN 978-3-658-00853-6.
- [32] Braess, H. H.; Seiffert, U.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN - 978-3-658-01691-3.
- [33] Tokay, D.; Short, D. A.: Evidence from Tropical Raindrop Spectra of the Origin of Rain from Stratiform versus convective Clouds. Tokay and Short (1996), S. 355 - 371.
- [34] Bockelmann, W. D.: Auge – Brille – Auto. 2. Aufl. Heidelberg: Springer Berlin, 2012. - ISBN 978-3-642-93316-5.
- [35] Bosch, R. GmbH.: Autoelektrik / Autoelektronik. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2013. - ISBN 978-3-322-91560-3
- [36] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42020X0575&from=DE> , abgerufen am 04.08.2023
- [37] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010R1008>, abgerufen am 04.08.2023
- [38] [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42014X0212\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42014X0212(01)&from=EN), abgerufen am 06.08.2023.
- [39] <https://www.nvidia.com/de-de/autonomous-machines/embedded-systems/jetbot-ai-robot-kit/>, abgerufen am 22.10.2023.
- [40] Kawakura, S.; Shibasaki, R.: Deep Learning-Based Self-Driving Car: JetBot with NVIDIA AI Board to Deliver Items at Agricultural Workplace with Object-Finding and Avoidance Functions. European Journal of Agriculture and Food Sciences (2020) Vol. 2, No. 3, S. 1-9.
- [41] <https://www.waveshare.com/jetbot-ai-kit.htm>, abgerufen am 22.10.2023

# Anlagen

## Sensor Prüfstaub KSL 570

### Zusammensetzung:

- 80 % Prüfstaub ECE R45 2.1.2 (Prüfstaub für Tests an Scheinwerfern)  
 9 Gewichtsteile Siliziumsand ( $\text{SiO}_2$ ) mit einer Korngrößenverteilung zwischen 0-100  $\mu\text{m}$ \*  
 1 Gewichtsteil pflanzlicher Kohlenstaub mit einer Korngrößenverteilung zwischen 0-100  $\mu\text{m}$   
 0,2 Gewichtsteile von NaCMC  
 5 Gewichtsteile Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ )  
 20 % Volleipulver (enthält Fette und Eiweiße für eine bessere Haftung auf glatten Oberflächen)

## Sensor test dust KSL 570

### Composition:

- 80 % Test dust according ECE R45 2.1.2 (Test dust for testing of headlamps)  
 9 parts by weight of silica sand ( $\text{SiO}_2$ ) with a particle size distribution of 0-100  $\mu\text{m}$ \*  
 1 part by weight of vegetal carbon dust with a particle size distribution of 0-100  $\mu\text{m}$   
 0.2 parts by weight of NaCMC  
 5 parts by weight of sodium chloride ( $\text{NaCl}$ )  
 20 % Whole egg powder (contains fat and proteins for better adhesion on smooth surfaces)

\*

Teilchengröße / particle size ( $\text{SiO}_2$ , in $\mu\text{m}$ )	Verteilung / distribution (in %)
0 – 5	12 ± 2
5 – 10	12 ± 3
10 – 20	14 ± 3
20 – 40	23 ± 3
40 – 80	30 ± 3
80 – 100	9 ± 3

Hinweis: Für eine gute Haftung auf der Oberfläche muss der Prüfstaub in Kombination mit Feuchtigkeit (z.B. Wasser) aufgebracht werden.

Note: For good adhesion to the surface, the test dust must be applied in combination with moisture (e.g. water).

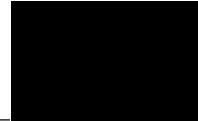
Abbildung 47: Zusammensetzung Sensor Prüfstaub KSL 570

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

München, 04. Januar 2024

David Scheiber



Ort, Datum

Vorname Nachname