

Umfeldbezogene Stabilisierung von Fahrzeugscheinwerferprojektionen

Dissertation

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von
M. Sc. Sinan Yargeldi
aus Bad Urach

Tübingen
2023

Gedruckt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Eberhard Karls Universität Tübingen.

Tag der mündlichen Qualifikation:

27.05.2024

Dekan:

Prof. Dr. Thilo Stehle

1. Berichterstatter/-in:

Prof. Dr. Andreas Schilling

2. Berichterstatter/-in:

Prof. Dr. Thomas Linkugel

This document is set in Palatino, compiled with pdfL^AT_EX₂^ε and Biber.

Danksagung

Ich möchte mich nachfolgend bei allen Personen bedanken, die mich auf dem Weg zur und während meiner Promotionszeit bei der Mercedes-Benz AG in Sindelfingen unterstützt und zur Arbeit beigetragen haben.

Als erstes möchte ich dabei meinem Doktorvater Prof. Dr. Andreas Schilling danken, welcher mir diese Promotion ungeachtet der Tätigkeit in der Industrie ermöglicht hat, sowie Prof. Dr. Thomas Linkugel für das Übernehmen der Zweitbetreuung. Vielen Dank für das entgegengebrachte Vertrauen und die zahlreichen spontanen und konstruktiven Austauschrunden.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Axel Müller, der mich stets durch sein fachliches Wissen und seine Erfahrungen unterstützt hat. Vielen Dank für die zahlreichen Ideen, Anregungen und investierten Stunden, selbst bei spontanen Nachtfahrten bis in später Stunde. Zudem danke ich meinem Teamleiter Stefan Töpfer für den stetigen Rückhalt und den zeitlichen Freiraum, mich ungestört der Arbeit widmen zu können. Euch beiden gilt mein besonderer Dank für die Chance und das Vertrauen, in solch einem spannenden und herausfordernden Themengebiet diese Dissertation verfassen zu dürfen.

Danken möchte ich außerdem allen Kollegen in der Abteilung für die Entwicklung von Lichtsystemen. Ich habe stets die angenehme Arbeitsatmosphäre und die humorvollen Gespräche, selbst in kritischen Situationen, geschätzt.

Weiterhin möchte ich allen betreuten Studenten danken, die mit ihren Arbeiten dieser Promotion beigesteuert haben. Die fachlichen Diskussionen und die lockere Zusammenarbeit haben die Arbeit entscheiden vorangetrieben.

Auch gilt ein besonderer Dank meinem Betreuer und Teamleiter während der Masterarbeit, Holger Seibold und Davide Baccarin. Ohne ihren Ansporn und die Mithilfe wäre der Entschluss zur Promotion und die Möglichkeit nicht zu Stande gekommen.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie, meinen Eltern und meinem Bruder, danken, für die jahrelange Unterstützung und das Interesse an meinem gesamten Bildungsweg. Ohne euch wäre nichts hiervon möglich gewesen.

Abstract

Since the invention of the car, headlights (or alternatively called headlamps) are a part of its base functionality and a design feature with growing importance. As with every other component, the headlights also expanded their range of functions with every technological advancement and outgrew the purpose of solely illuminating the scene. In the course of time, first signaling and warning functions like turn indicators and high-beam were added. These functions were always limited to manually activatable additional light sources. Today, newest high-end headlamps are a intricate collection and combination of many different sub-components and -functions, which interact and communicate intelligently with the occupants and other cars in the vicinity.

An example for this are adaptive high-beam functions, which eliminate glare of other cars, or projections showcasing assisting and warning symbols. These functions are made possible with the help of more powerful and individually selectable and controllable light modules inside the headlamps.

The output of the headlamps however is highly affected by the vehicle dynamics. Due to the movement of the car body and with it of the headlights, the light distributions on the environment experiences rapid and stark changes. This effect is further amplified by changes of the driving ground.

This work describes and showcases a system for the stabilization of the light distribution projected by the car headlights. Its main function is to keep a constant distance of the light distribution in the environment, independent from the vehicle dynamics and street changes, to allow for a illumination and projection characteristic as constant as possible from the viewpoint of the driver and the occupants.

An additional side effect of this stabilization is the improvement of already existent light functions which are dependent on the positioning of light in the environment.

Kurzreferat

Der Fahrzeugscheinwerfer ist seit der Erfindung des Automobils Bestandteil aller Fahrzeuge und ein zunehmend bedeutendes Designelement. Wie auch alle anderen Komponenten im Auto ist er im Zuge der technischen Entwicklung, vor allem im elektronischen Bereich, weiter verbessert worden und seiner Rolle als reine Ausleuchtfunktionalität entwachsen. Im Laufe der Zeit kamen schnell Signal- und Warntaufgaben dazu, beispielsweise in Form eines Blinkers oder des Fernlichts, welche durch zusätzliche manuell aktivierte Lichtquellen umgesetzt wurden. Heute stellen die neuesten Scheinwerfermodelle eine Ansammlung vieler verschiedener Teilkomponenten und -funktionen dar, welche intelligent mit dem Insassen, dem restlichen Fahrzeug und der Umwelt kommunizieren.

Ein Beispiel hierfür stellen adaptive Fernlichtfunktionen dar, welche andere Verkehrsteilnehmer entblenden, oder die Projektionsfunktion, welche Hilfs- und Warnsymbole anzeigen. Ermöglicht werden diese Innovationen durch immer leuchtstärkere, besser ansteuerbare und vor allem höher auflösende Lichtmodule, die im Scheinwerfer integriert sind.

Diese Systeme sind jedoch immer stark von der Fahrzeugdynamik beeinflusst. Das Fahrzeug und seine Umgebung stellen zwei unterschiedliche Systeme dar, die durch das Fahrwerk dynamisch und damit zeitlich variabel gekoppelt sind. Hierdurch kommt es während der Fahrt, vor allem bei Änderungen des Fahrbahnuntergrundes, zu äußerst starken und schnellen Veränderungen der relativen Scheinwerferposition und damit zu Variationen der dargestellten Lichtverteilungen.

In dieser Arbeit soll ein System zur Stabilisierung der durch die Fahrzeugscheinwerfer projizierten Lichtverteilung entworfen und beschrieben werden. Die Funktion besteht darin, das Lichtbild stabil an der gewünschten Position in der frontseitigen Umgebung des Fahrzeugs zu halten, um somit

unabhängig von den Fahrzeug- und damit den Scheinwerferbewegungen eine für den Fahrzeugführer möglichst gleichbleibende Beleuchtungs- und Projektionscharakteristik zu erreichen.

Darüber hinaus lässt sich hierdurch die Qualität intelligenter Lichtfunktionen verbessern, welche auf eine exakte Positionierung im Umfeld, wie beispielsweise fahrbahnbezogene Markierungen, angewiesen sind.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	vii
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzungen	3
1.3. Abgrenzung und Einschränkungen	4
1.4. Wissenschaftliche Beiträge	6
1.4.1. Betreute wissenschaftliche Arbeiten	7
1.4.2. Publikationen	8
1.4.3. Patente	8
1.5. Struktur der Arbeit	9
2. Grundlagen	11
2.1. Fahrzeugscheinwerfer	11
2.1.1. Lichtquellen	12
2.1.2. Lichtfunktionen	13
2.1.3. Aufbau des Fahrzeugscheinwerfers	14
2.1.4. Lichtverteilungen	16
2.1.5. Optik	18
2.1.6. Pixellicht	19
2.1.7. Projektionen	23
2.1.8. Steuerung der Lichtverteilung	25
2.2. Fahrdynamik	31
2.2.1. Algebraische Notation	31
2.2.2. Fahrzeugbewegungen	32
2.2.3. Koordinatensysteme	32
2.2.4. Fahrdynamikerfassung	38
2.3. Umgebungsrekonstruktion	42
2.3.1. Hochgenaue Kartendaten	42

2.3.2.	Radar	44
2.3.3.	LiDAR	44
2.3.4.	Indirektes Time-of-Flight	44
2.3.5.	Kamerabasierte Rekonstruktion	46
2.4.	Kamerasysteme	49
2.4.1.	Aufbau	50
2.4.2.	Sensorik	51
2.4.3.	Verschlussverfahren	54
2.4.4.	Kameraabbildung	56
2.4.5.	Verzerrungen	60
2.4.6.	Mehransichten-Geometrie	64
2.5.	Digitale Bildverarbeitung	66
2.5.1.	Darstellung auf dem Bildarray	66
2.5.2.	2D-Transformation	67
2.5.3.	Projection-Mapping	68
2.5.4.	Bildberechnung	70
2.6.	Bewegungskompensationssysteme	72
2.6.1.	Mechanisch	72
2.6.2.	Elektronisch	75
2.7.	Versuchsträger	76
3.	Theoretische Betrachtungen	79
3.1.	Aufgabendefinition	79
3.1.1.	Systemaufbau	80
3.1.2.	Grundzustand	83
3.2.	Variation der Projektionsgeometrie	84
3.2.1.	Fahrzeug- und Scheinwerferbewegungen	85
3.2.2.	Einflusskomponenten	89
3.2.3.	Projektionsflächenvariation	95
3.2.4.	Zusammenfassung	98
3.3.	Anforderungen an die Kompensation	103
3.3.1.	Menschliches Wahrnehmung	103
3.3.2.	Genauigkeit	106
3.3.3.	Timing	108
3.3.4.	Gütekriterien und Metriken	110

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion	113
4.1. Theorie	114
4.2. Strukturiertes Licht im Fahrzeugeinsatz	116
4.2.1. Geometrie des Aufbaus	117
4.2.2. Störquellen	118
4.2.3. Unsichtbarkeit	119
4.2.4. Hardwarekontrolle/Synchronisation	123
4.2.5. Zielsetzung	124
4.3. Messsystem	124
4.3.1. Verfahrensauswahl	125
4.3.2. Kalibrierung Messsystem	126
4.3.3. Merkmalsextraktion	134
4.3.4. Gütekriterium zur Ebenenauswahl	141
4.3.5. Linien	143
4.3.6. Zusammenführen zur 3D-Rekonstruktion	144
4.4. Ergebnisse	145
4.4.1. Vorgehen	146
4.4.2. Szenario 1	146
4.4.3. Szenario 2	150
4.4.4. Szenario 3	153
4.4.5. Diskussion	155
5. Nick- und Wankprädiktion	161
5.1. Voraussetzungen	163
5.2. Grundlagen	165
5.2.1. Lineare und nichtlineare Regression	165
5.2.2. Funktionsweise	166
5.3. Auswahl des Prädiktionsverfahrens	167
5.3.1. ElasticNet Regression	168
5.3.2. Neuronales Netz	169
5.3.3. Ergebnisse	170
5.4. Prädiktionssystem	172
5.4.1. Konfiguration	172
5.4.2. Eingänge	173
5.4.3. Vergangene Messpunkte	174
5.4.4. Prädiktionszeit	176
5.4.5. Aufbau und Struktur	177

5.5. Ergebnisse und Komplexität	179
5.5.1. Messungen	179
5.5.2. Komplexität	182
6. Modellierung der Fahrzeugdynamik	185
6.1. Fahrzeugdynamik	185
6.1.1. Aufbaubewegungen im Fahrzeug	186
6.2. Kinematisches Fahrzeugmodell	191
6.2.1. Inertialsensorik	191
6.2.2. Geschwindigkeitsberechnung	195
6.2.3. Abschätzung Erdgravitation	197
6.3. Fahrwerksdynamik	199
6.4. Gesamtsystem	202
7. Bildverarbeitung	205
7.1. Anti-Aliasing	206
7.1.1. Interpolation	207
7.1.2. Supersampling	207
7.1.3. Evaluation	211
7.1.4. Berechnung	217
7.2. 2D-Transformation	219
7.2.1. Systemauslegung	219
7.2.2. Kompensation Scheinwerferbewegungen	223
7.3. Projection-Mapping	228
7.3.1. Grundzustand	228
7.3.2. Fahrbahnerkennung	231
7.3.3. Bildberechnung	233
8. Projektionsstabilisierung	235
8.1. Kompensation der Fahrzeugdynamik	235
8.1.1. Scheinwerferrotationen	236
8.1.2. Hubbewegung	248
8.2. Messungen	250
8.2.1. Dynamikkompensation	251
8.2.2. Projektions-Mapping	258
8.3. Fazit	262

9. Zusammenfassung	263
10. Ausblick	267
A. Leuchtweitenregulierung	271
A.1. Prinzip	271
A.2. Messmodell	272
A.2.1. Coriolisbeschleunigung	273
A.2.2. Zentripetalbeschleunigung	273
A.2.3. Eulerbeschleunigung	274
A.2.4. Dislokationsbeschleunigungen	274
A.2.5. Gravitation	275
A.2.6. Kombiniertes Messmodell	275
A.3. Kombiniertes Fahrwerksmodell	276
A.4. Test-Metriken	278
B. Sensorfehler	281
C. Simulation	289
C.1. Simulationsumgebung	289
C.2. FADYS	290
C.2.1. Fahrzeugbeschreibung	291
C.2.2. Manöverbeschreibung	292
C.3. Simulationsausgabe	293
D. DMD-Scheinwerfer	295
E. Zusatzmaterial	299
E.1. Statisches Abtastverhalten	299
E.2. Dynamisches Abtastverhalten	302
Literatur	305
Onlinequellen	313

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Unterstützende Symbolprojektion des Scheinwerfers durch Anzeige eines Navigationspfeils [©Mercedes-Benz AG]	2
1.2.	Projektionsdarstellung bei Überfahrt einer Bodenwelle	3
1.3.	Ablaufdiagramm der Einzelkomponenten im Gesamtsystem	10
2.1.	Digital Light DMD-Scheinwerfer des Mercedes-Benz Baureihe 223	14
2.2.	Schematische Darstellung des DMD-Scheinwerfers mit markierten Lichtmodulen	15
2.3.	Fahrspurprojektion im Baustellen-Szenario	21
2.4.	Größendarstellung eines μ LED-Chips	22
2.5.	Digitales Bild der Projektion und die tatsächliche Darstellung durch ein μ LED-System auf einer weißen Wand	24
2.6.	Korrektur der Symbolposition im Nickfall	29
2.7.	Darstellung der Bewegungen im fahrzeugfesten KS	33
2.8.	Übersicht der drei in der DIN ISO 8855 definierten Bezugssysteme	34
2.9.	x-y und x-z Ebenen des Straßen-KS	36
2.10.	Spektrale Empfindlichkeit elektronischer Sensoren	52
2.11.	Spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Farbkanäle	53
2.12.	Auswirkung des Rolling-Shutter-Effekts bei bewegten Objekten	55
2.13.	Abbildungsgeometrie einer Lochkamera mit Kamerazentrum C und Hauptpunkt p	57
2.14.	Pixel in Rechnerkoordinaten	58
2.15.	Schematische Darstellung der radialen und tangentialen Verzerrung	61
2.16.	Schematische Darstellung der Epipolargeometrie mit zwei Ansichten	65
2.17.	Typische Abblend-Lichtverteilung mit Anstieg	67

2.18. Beispielhafte Symbolprojektion zwei verschachtelter Kreise	67
2.19. Darstellung des eingesetzten Versuchsaufbaus	77
2.20. Schematischer Signalaufbau der prototypischen Fahrzeugintegration	78
3.1. Seitlich Ansicht der Projektionsgeometrie im Grundzustand	83
3.2. Symbol für Bodenprojektion vor und nach einer perspektivischen Transformation	84
3.3. Projektion eines Zebrastreifens verteilt über beide Scheinwerfer	87
3.4. Schematische Projektion eines Navigationssymbols aus der Vogelperspektive	88
3.5. Verschiebung der Projektionslinie im Wankfall von der ursprünglichen Position in die Neue	91
3.6. Verschiebung des Projektionsbereichs bei verschiedenen Nickwinkeln des Scheinwerfers	92
3.7. Bewegungen der Scheinwerfer verursacht durch das Fahrzeugnicken- und wanken	93
3.8. Seitliche Ansicht der Fahrzeug- und Projektionsebenen	96
3.9. Veränderung der aktiven Projektionsfläche	97
3.10. Beschreibung der Fahrbahnkrümmung relativ zur aktuellen Fahrzeuglage	97
3.11. Projektionen auf eine ebene Fahrbahn und einen Verwindungshügel	98
3.12. Symbolprojektion auf eine beschädigte Fahrbahn	99
3.13. Übersicht der Fehlerquellen und deren Folgen für die Projektion	100
3.14. Signalflusskette des gesamten Bildstabilisierungsalgorithmus	102
3.15. Einschaltzeitraum der hochauflösenden Matrix im Vergleich zum Einschaltsignal	109
4.1. Position der Fahrbahnerfassung im Gesamtsystem	113
4.2. Projektion auf nasser Fahrbahn	119
4.3. Fusion eines Musters mit seinem Komplement	120
4.4. Einbettung des Musters in die PW-Modulation der Pixelhelligkeiten	122
4.5. Zeitverlauf für die Belichtung der Kamera und der Musterprojektion	123
4.6. Prinzipskizze der Rekonstruktion	126

4.7. Orientierung Weltkoordinatensystem relativ zu Kamerakoordinatensystem je Schachbrettpose	127
4.8. Projektion einer Horizontallinie im Fahrzeugvorfeld durch Aktivierung der untersten Pixelreihe	129
4.9. Unterscheidung einer projizierten Laserlinie und einem durch ein Scheinwerfer-Kamera-System projiziertes Horizontalmuster	130
4.10. Schematische Darstellung des Kalibrationsverfahrens	131
4.11. Vergleich zwischen spezifischen triangulierter und auf der Kamerakalibrierung basierender Punkte inkl. nichtlinearer Optimierung der Ebenenparameter	133
4.12. Schematischer Ablauf des Algorithmus zur 3D-Rekonstruktion einer Szene	135
4.13. Ausschnitte aus dem Trainingsdatensatz für YOLOv4	137
4.14. Schematische Darstellung des Filterdesigns	139
4.15. Darstellung des Einflusses einer Frequenzfilterung	139
4.16. Schematische Darstellung der Detektion von Ausreißern	141
4.17. Visuelle Unterscheidung der Reflexionseigenschaften verschiedener Objekte im Fahrzeugvorfeld	142
4.18. Seitliche Vogelperspektive auf die Streifenprojektion vor dem Fahrzeug	143
4.19. Triangulation zwischen Projektionsebene und Kamerasichtstrahl	144
4.20. Beschreibung einer Szene im globalen rotierten Kamerakoordinatensystem	145
4.21. Darstellung der Ausprägung des Horizontalmusters auf einem Objekt bei geringem Abstand zwischen Objekt und Scheinwerfer-Kamera-System	147
4.22. Ergebnisse Szenario 1 - Scheinwerfer-Kamera-System und Intel RealSense D455 im Vergleich	148
4.23. Ergebnisse Szenario 1 - Scheinwerfer-Kamera-System und Intel RealSense D455 überlagert	149
4.24. Ergebnisse Szenario 2 - Scheinwerfer-Kamera-System und Intel RealSense D455 im Vergleich	151
4.25. Ergebnisse Szenario 2 - Scheinwerfer-Kamera-System und Intel RealSense D455 überlagert	152
4.26. Ergebnisse Szenario 3 - Scheinwerfer-Kamera-System und NND aus beiden Systemen ermittelt	154

4.27. Schematische 1D-Darstellung der Auswirkung eines Fehlers in den Eulerwinkel zur Kompensation der Rotation zwischen Kamera und Fahrzeug	157
4.28. Zwei auftretende Fehldetektionen des YOLO-Algorithmus' .	158
4.29. Abweichungen des projizierten Horizontalmusters ggü. einem idealen Rechteck	159
4.30. Reflexionen an Objekten in Richtung der Kamera aufgrund Abblendlicht des Scheinwerfers	160
5.1. Signalkette der Bildgenerierung	161
5.2. Position der Praediktion im Gesamtsystem	162
5.3. Ergebnisse der Nickwinkelprädiktion nach Cramer und Schmidt	163
5.4. Vereinfachtes Funktionsprinzip der Prädiktion der Nickwinkeländerung $\delta\psi$	166
5.5. Aufbau des verwendeten Netzwerks in Keras	170
5.6. Loss der ElasticNet Regression in Abhängigkeit der Iterationen	171
5.7. Loss des Neuronalen Netzwerks in Abhängigkeit der Iterationen	172
5.8. Vergleich der Prädiktion und der tatsächlichen Nickwinkel für ein Messpunkt und zwei Messpunkte pro Eingangssignal	174
5.9. Maximaler Prädiktionsfehler für eine unterschiedliche Anzahl an verwendeter Datensätze bei Prädiktionszeiten von 40 und 50 ms	175
5.10. Maximaler Prädiktionsfehler für verschiedene Prädiktionszeiten	176
5.11. Ablauf des Online-Learnings	179
5.12. Nickwinkelverlaufsausschnitt aus der Beispiel-Messfahrt 1 . .	180
5.13. Nickwinkelverlauf während der Beispiel-Messfahrt 2	181
5.14. Wankwinkelverlauf während der Beispiel-Messfahrt 1	182
5.15. Wankwinkelverlauf während der Beispiel-Messfahrt 2	182
6.1. Schwingungsphänomene im Fahrzeug	186
6.2. Beispielhafter Frequenzgang von in Fahrzeugen auftretenden Aufbaubeschleunigungen in Hubrichtung	188
6.3. Frequenzgang der Nick- und Wankbewegungen in verschiedenen Fahrwerkseinstellungen	189
6.4. Übersicht verschiedener Fahrzeugmodelle	189
6.5. Fahrzeugzweispurmodell	190
6.6. Struktur des entworfenen Kalman Filters	199

6.7. Übersicht der Dynamikbestimmung des Fahrzeugs	203
7.1. Abtastpunkte nach NVIDIAs Quincunx	208
7.2. Verschiedene Muster für die Abtastung	209
7.3. Übersicht der 6 untersuchten Projektionen	214
7.4. Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Abblendlichtverteilung	215
7.5. Symbolprojektion auf dem Pixelarray für ein Pseudo- Nick- ausgleich	218
7.6. Digitale Bildmatrix vor und nach dem Paddingvorgang	218
7.7. Projektion eines Lichttepics aus der Vogelperspektive	220
7.8. Position der Kompensation der Scheinwerferbewegungen im Gesamtsystem	223
7.9. Verschiebung der Symbolposition im Abnickfall des Fahrzeugs	225
7.10. Verdrehung des Symbols im Wankfall des Fahrzeugs	225
7.11. Position der Fahrbahnanpassung im Gesamtsystem	228
7.12. Vergleich einer Bodenprojektionsdarstellung aus Fahrer- und Beifahrersicht	229
7.13. Sichtstrahl und die drei nächstgelegenen Punkte	231
7.14. Vergleich der beiden Rekonstruktionsvarianten am Beispiel einer Schwellendetektion	233
7.15. Ablauf der Pixelzuordnung	234
8.1. Zeitlicher und funktionaler Ablauf der gesamten Projektions- stabilisierungsalgorithmik	236
8.2. Zeitlicher Verlauf des Nickwinkelsignals berechnet über die Fahrzeugachssensoren und der neu aufgestellten Algorithmik über die Inertialsensoren	242
8.3. Zeitlicher Verlauf der Metriken 1 bis 3 am Beispiel einer ausgewählten Mischfahrt	243
8.4. Darstellung eines beispielhaften Winkel- und Drehratenver- laufs mit resultierendem Summensignal	246
8.5. Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion bei einem Bremsvor- gang	252
8.6. Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion im stabilisierten Vi- deobild bei der Fahrt durch eine Kurve	253

8.7. Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion bei einer stationären Kreisfahrt	254
8.8. Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion bei der Überfahrt einer Geschwindigkeitsschwelle	255
8.9. Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion im stabilisierten Videobild bei der Überfahrt einer Bodenwelle	256
8.10. Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion im stabilisierten Videobild bei der Überfahrt einer defekten Fahrbahn	257
8.11. Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion bei der Überfahrt eines Steigungshügels	259
8.12. Symbolprojektion auf einer stark beschädigten Fahrbahn mit großen Unebenheiten	260
8.13. Symbolprojektion auf eine Geschwindigkeitsschwelle	261
8.14. Symbolprojektion auf einen Steigungshügel vor und nach der Anpassung durch das Projection Mapping	261
A.1. Beispielhafter Messverlauf der unterschiedlichen Quellen und der reale Winkel	279
B.1. Typische Fehler einer Sensormessung	281
B.2. Quantisierungsfehler, der durch die beschränkte Auflösung einhergeht	283
B.3. Verrauschtes Ausgangssignal eines MEMS-Gyroskops	286
B.4. Temperaturabhängiger Ausgang eines MEMS-Accelerometers	287
C.1. Schematischer Signalaufbau des Simulatoreaufbaus	291
C.2. Screenshot der visuellen Simulation über VTD	293
D.1. Nahaufnahme eines Mikrospiegel-Arrays unter dem Elektronenmikroskop	296
D.2. Zusammenfassung einzelner Mikrospiegel zu einer gitterförmigen Pixelstruktur	297
E.1. Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Kollisionswarnung 2	299
E.2. Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Baustellenwarnung	300

E.3. Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Departure Warning	300
E.4. Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf den Spotlight	301
E.5. Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Kollisionswarnung 2	301
E.6. Stabilisierte Symbolprojektion durch Quincunx mit Prefiltering	302
E.7. Stabilisierte Symbolprojektion durch FlipTri ohne Prefiltering	303

1. Einleitung

1.1. Motivation

Neueste Fahrzeugscheinwerfersysteme sind nicht mehr nur reine Beleuchtungsapparate, sondern vereinen eine Vielzahl an Funktionen in einem Bauteil. Dabei passen die komplexen integrierten Teilsysteme ihr Verhalten intelligent dem Umfeld des Fahrzeugs an. In den vergangenen Jahren kam es zu stetigen Weiterentwicklungen, um die Sicherheit des Fahrzeugführers und der Insassen bei schlechten Sichtverhältnissen zu erhöhen.

Dies beinhaltet längst nicht mehr nur die Ausleuchtung der Straßensituation vor dem Fahrzeug und die Signalwirkung für den umgebenden Verkehr. Fahrzeugscheinwerfer sind mittlerweile in der Lage, sich aktiv an die Verkehrssituation anzupassen und die eigene Lichtverteilung zu adaptieren. So werden beispielsweise andere Verkehrsteilnehmer oder Verkehrszeichen über die Fahrzeugkamera erkannt und die entsprechenden Bereiche im Lichtbild der Scheinwerfer ent- bzw. ausgeblendet oder die allgemeine Leuchtweite an die Fahr- und Straßensituation angepasst.

Um die Arbeitsweise dieser Funktionen zu verbessern und eine feinere Steuerung zu ermöglichen, wurden in den letzten Jahren immer hochauflösendere Lichtsysteme für den Automobileinsatz adaptiert. Diese hochauflösenden Systeme ermöglichen dadurch auch weitere Funktionen, wie die Projektion von Informationen sowie Hilfs- und Warnsymboliken für den Fahrzeugführer direkt an den relevanten Stellen des Fahrzeugumfelds, ohne dass der Fahrer seinen Blick von der Verkehrssituation abwenden muss. Beispiele hierfür sind einerseits die Markierung potenziell gefährlicher Objekte und Verkehrsteilnehmer in der Umgebung und andererseits direkte Projektionsfunktionen wie zusätzliche Fahrspurmarkierungen oder Navigationspfeile oder auch andere Benachrichtigungen wie Geschwindigkeits-

1. Einleitung

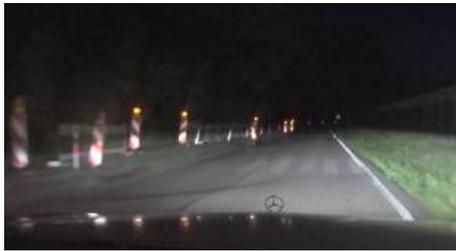
und Müdigkeitswarnungen. In 1.1 ist beispielhaft eine Pfeilprojektion durch den Fahrzeugscheinwerfer dargestellt.



Abbildung 1.1.: Unterstützende Symbolprojektion des Scheinwerfers durch Anzeige eines Navigationspfeils [©Mercedes-Benz AG]

Diese aktiven Anpassungen erfolgen im Rahmen einer statischen Erfassung des Umgebungsgeschehens, wie beispielsweise durch Bilder der verbauten Fahrerassistenzkamera, oder treffen wie bei Projektionsfunktionen die Annahme einer statischen Fahrzeugposition und -lage gegenüber der Fahrbahn. Dadurch, dass diese Applikationen auf eine genaue Platzierung im Umfeld angewiesen sind, haben sie jedoch stark mit der Dynamik des Fahrzeugkörpers zu kämpfen und werden direkt von ihr beeinflusst. Bei der Fahrt kommt es durch diese Dynamik zu stetigen Veränderungen der Scheinwerferpose, wodurch sich das dargestellte Bild mitunter stark verändert.

In Abbildung 1.2 ist eine solche Situation am Beispiel einer Überfahrt einer ausgedehnten Bodenwelle dargestellt. Vom Fahrzeug wird währenddessen ein Zebrastrifen bestehend aus sechs Einzelstreifen projiziert, wobei jeweils drei vom linken und rechten Fahrzeugscheinwerfer ausgestrahlt werden. Aufgrund der Unebenheit der Fahrbahn gerät das Fahrzeug in Nickbewegungen, die sich direkt in der Form und Verschiebung des projizierten Symbols widerspiegeln. Im dritten Bild ist der projizierte Zebrastrifen gar



(a) Normalzustand



(b) Abnicken/Bodenwelle im Projektionsbereich



(c) Aufnicken/Erhebung unter Vorderachse

Abbildung 1.2.: Projektionsdarstellung bei Überfahrt einer Bodenwelle

nicht mehr zu erkennen, da das Symbol in den Nachthimmel projiziert wird, obwohl eine dynamische Leuchtweitenregulierung im Fahrzeug verbaut ist.

1.2. Zielsetzungen

Ziel dieser Arbeit ist es, ein System zur Stabilisierung der Lichtverteilung von Fahrzeugscheinwerfern aufzustellen, welches die Auswirkungen der fahrzeugeigenen Bewegung ausgleicht und für eine robuste und stetige Darstellung des ausgeworfenen Lichtbilds in der Umgebung sorgt.

Im Rahmen dieses Vorhabens werden im ersten Schritt Anforderungen an das System evaluiert und ein Umgebungsmodell des Fahrzeugs aufgestellt, welches eine Beschreibung für die Position des Lichtbilds in Abhängigkeit der Eigenbewegungen und des Fahrbahnverlaufs liefert. Hierfür sollen bereits im Fahrzeug eingesetzte Scheinwerfertechnologien und Sensoren verwendet werden, welche die Erkennung des Umfelds vor dem Fahrzeug

verbessern und eine robuste Abschätzung der Bewegungen der Fahrzeugmasse ermöglichen sollen. Diese Informationen sollen anschließend abseits von anderen Subsystemen im Fahrzeug, die auf sie zugreifen, dazu genutzt werden, die Projektion von hochauflösenden Bildern durch die Scheinwerfer auf der Fahrbahn zu stabilisieren und von der Fahrzeugdynamik zu entkoppeln.

1.3. Abgrenzung und Einschränkungen

Diese Arbeit beinhaltet trotz der Fokussierung auf ein einzelnes Bauteil im Fahrzeug und darüber hinweg auf eine einzelne Komponente hieraus eine Vielzahl an Untersuchungsfeldern, die sich mit verwandten Themenfeldern teilweise überlappen und überschneiden. Diese Felder bestehen sowohl aus Bereichen im automobilen Umfeld als auch wissenschaftlichen Forschungsgebieten. Aus diesem Grund soll hier eine kurze Abgrenzung zu den jeweiligen Domänen gegeben werden.

- Im Vergleich zu Scheinwerferfunktionen mit ähnlichem Aufgabenbereich wie etwa die Leuchtweitenregulierung, wirkt die Projektionsstabilisierung bei einem höheren Frequenzbereich, was die kompensierten Anregungen betrifft, und erweitert darüber hinaus die Regelung um den Aspekt der Adaption auf das Projektionsfeld.
- Anders als bei Bildstabilisierungsfunktionen, wie sie beispielsweise bei Kameras eingesetzt werden, kann keine Nachbearbeitung der dargestellten Bilder bzw. Projektionen stattfinden. Weiterhin müssen bei dem Teilsystem zur Lage- und Situationserfassung die möglichen Umweltbedingungen und das unveränderliche technische Setup berücksichtigt werden. Diese Punkte schränken in den entsprechenden Disziplinen die Handlungsrichtungen ein und grenzen die Untersuchungen stark von Arbeiten unter Laborbedingungen ab.
- Ähnliche wissenschaftliche Arbeiten auf diesem Bereich haben sich auf reine Tiefenrekonstruktions- [Schneider, 2019] oder Stabilisierungsaufgaben [Murata und Fujinami, 2011][Marius Tico und Markku Vehvilainen, 2008] konzentriert. Die vorliegende Arbeit betrachtet

1.3. Abgrenzung und Einschränkungen

jedoch möglichst alle Teilaspekte, die zum Bilden eines Komplettsystems im Fahrzeug als notwendig und realistisch erachtet werden. Weiterhin werden nur hochauflösende Lichtsysteme der nächsten Generation betrachtet, die aufgrund der technischen Möglichkeiten und der absehbaren zukünftigen Marktdurchdringung in den folgenden Modellgenerationen die relevantesten Einsatzplattformen darstellen.

Die Arbeit ist, wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, bei den verwendeten Werkzeugen möglichst auf bereits für den Automotive-Einsatz spezifizierte und verfügbare oder bereits für andere Systeme verbaute Komponenten eingeschränkt. Durch diese Einschränkung wird beabsichtigt, ein Gesamtsystem zu entwickeln, welches ein kosten- und zeittechnisch umsetzbares Konzept aufweist und damit Integrationsmöglichkeiten für ein Serienfahrzeug bietet.

Aus diesem Grund werden im späteren Verlauf (Teil-)Technologien aus dreierlei Gründen von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen: Der erste Aspekt betrifft die voraussichtlichen Kosten der Komponenten bei einem Serieneinsatz. Dies betrifft selbstverständlich nur Teile, die nicht bereits im Einsatz befindlich sind, unwirtschaftlich hohe Einsatzkosten aufweisen oder zeitgleich zusätzliche Einsatzkosten aufweisen und nicht für andere Systeme im Fahrzeug nutzbar sind. Diese werden in der Umsetzung nicht berücksichtigt. Ein Beispiel kann in Abschnitt 2.3.3 gefunden werden.

Der zweite Faktor betrifft die zeitliche Umsetzbarkeit. Konzepte oder Technologien, die durch weitergehende Entwicklungen und Evolutionsstufen eine sehr gute Anwendbarkeit liefern könnten, jedoch in absehbarer Zeit nicht die gesteckten Anforderungen erfüllen, werden nicht näher betrachtet. Als Beispiel kann hier im Voraus die Time-of-Flight-Technik benannt werden, welche in Kapitel 2.3.4 näher betrachtet wird.

Das dritte und letzte Kriterium betrifft fahrzeugbauspezifische Bedingungen. Bauformen oder Konzepte, die nicht in Schweinwerfern oder Fahrzeugen verbaut werden sollen, wie beispielsweise zusätzliche mechanisch bewegbare Teile, oder solche, die in nicht zulassungsfähigen Produkten resultieren, wie beispielsweise farbige Projektionen, werden im Rahmen der Arbeit nicht behandelt.

Im Verlauf der Arbeit werden mehrere Alternativen, die auf einen dieser drei Punkte fallen, angesprochen und erörtert.

1.4. Wissenschaftliche Beiträge

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt angeschnitten, sind die Hauptbeiträge dieser Arbeit aufgeteilt in mehrere Subsysteme, welche im Verbund das Gesamtsystem zur Projektionsstabilisierung bilden. Der erste Teil ist eine umfassende und detaillierte Beschreibung und Erarbeitung der Auswirkungen von Fahrzeugdynamik und Fahrbahn auf die projizierte Lichtverteilung von Fahrzeugen. Anschließend wird das Problem der Zustandserfassung erstens der Fahrzeug- und damit Scheinwerferbewegungen und zweitens der wechselnden Fahrbahneigenschaften und Konturen während der Fahrt untersucht. Hierzu wird ein System zur Prädiktion der Fahrzeugdrehungen implementiert und ein Verfahren zur Erfassung der Fahrbahnoberfläche mittels aktiver Triangulation unter Verwendung vorhandener Fahrzeugkomponenten entworfen. Abschließend erfolgt eine Bewertung und Einordnung der (Teil-)Resultate im Rahmen von Messkampagnen. Die wichtigsten Arbeitsergebnisse sind im Folgenden aufgelistet:

- **Formalisierung der Problemstellung:** Das Problem der Projektionsstabilisierung bei Fahrzeugen wird ausführlich aus mehreren Aspekten heraus untersucht und analysiert. Hierzu wird eine mathematische Beschreibung der Scheinwerferdynamik eingeführt, eingeteilt in die zwei Komponenten der Fahrzeugdynamik und Umgebungsbedingungen, insbesondere der Fahrbahnveränderungen.
- **Erfassung der Eigenbewegung:** Um auf Basis dieser Erkenntnisse ein funktionales Gesamtsystem aufstellen zu können, werden eine Reihe von Verfahren und Algorithmen eingeführt, welche die Fahrzeugbewegung modellieren und tracken. Hierzu wird die im Fahrzeug verwendete Sensorik ohne zusätzliche Komponenten eingesetzt. Es wird ein Algorithmus zur Berechnung der Fahrzeuglage in Echtzeit eingeführt sowie ein Teilsystem zur Prädiktion der Fahrzeugdrehungen im Millisekundenbereich, um die finale Latenz des Gesamtsystems zu reduzieren.

- **Fahrbahnerfassung:** Die zweite wichtige Eingangsgröße für die Stabilisierung stellt die Erfassung der Fahrbahn dar, wozu ein neuartiges System zur aktiven Triangulation mittels Fahrzeugscheinwerfer und Fahrerassistentenkamera eingeführt wird. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Robustheit und mathematischen Einfachheit des Algorithmus, um selbst unter schwierigen Witterungs- und Fahrbahnverhältnissen sowie eingeschränkter Rechenleistung verwertbare Ergebnisse zu liefern.
- **Stabilisierungsverfahren:** Aus der erstellten Problembeschreibung und den Fahrzeugbewegungen wird letztendlich eine zusammengesetzte Fahrzeugdynamik aufgestellt, welche die Positionierung und Orientierung der Scheinwerfer über der Fahrbahn beschreibt. Mit Hilfe dieser Scheinwerferpose und der erfassten Fahrbahntextur im Frontfeld wird im Anschluss ein zweistufiges System zur Projektionsstabilisierung aufgestellt. Dieses berechnet eine angepasste Lichtverteilung für die hochauflösende Leuchteinheit, welche die Einflüsse entweder nur der Scheinwerferdynamik oder aber auch der Fahrbahnunebenheiten ausgleicht.
- **Evaluation:** Eine Analyse der Ergebnisse wird anhand verschiedener Messungen im Fahrzeug durchgeführt, wobei die Funktionen hinsichtlich des Einhaltens zuvor bestimmter Metriken validiert werden. Getrennt werden hierbei die vier Hauptkomponenten des Systems betrachtet, bestehend aus der Prädiktionsgenauigkeit, der Rekonstruktion der Fahrbahn, der Güte der reinen Winkelstabilisierung, sowie der Anpassung von Symbolprojektionen an verschiedene Fahrbahntexturen.

Die folgenden Beiträge und Arbeiten entstanden während des Entstehungszeitraums dieser Arbeit:

1.4.1. Betreute wissenschaftliche Arbeiten

Madlindl, Patrick (15. Sep. 2021). »Erstellung eines mathematischen Modells zur Beschreibung der Projektionscharakteristiken eines Fahrzeugscheinwerfers«. Duale Hochschule Baden-Württemberg.

1. Einleitung

- Schad, Dennis (27. Sep. 2021). »Simulative Bildstabilisierung von Scheinwerferprojektionen«. Duale Hochschule Baden-Württemberg.
- Schweiker, Annette (26. Feb. 2021). *Prädiktion von Fahrzeugaufbaubewegungen*. Techn. Ber. Mercedes-Benz AG.
- Wehle, Max (27. Apr. 2022). »Tracing einer Lichtstruktur im dynamischen Fahrbetrieb zur 3D-Rekonstruktion«. Magisterarb. Universität Ulm (siehe S. 114, 126, 127, 129–131).

1.4.2. Publikationen

- Yargeldi, Sinan (25. Sep. 2023). »Compensation of Vehicle Movement and Surface Roughness for Headlamp Road Projections«. In: *ISAL 2023*.

1.4.3. Patente

- Yargeldi, Sinan (18. März 2021). »Verfahren zur dynamischen und eindeutigen Tiefeninformationsgewinnung für ein One-Shot Strukturiertes-Licht-System«. DE 102020007613 A1.
- Yargeldi, Sinan (9. Sep. 2022). »Scheinwerferkalibrierung im Feld mit Projektionsflächenerkennung«. 102022003313.5.
- Yargeldi, Sinan, Davide Baccarin und Andreas Schwarzenberger (21. Apr. 2022). »Method for improving accuracy of IMU AVAC«. DE102021006290.
- Yargeldi, Sinan, Axel Müller und Martin Borowski (28. Juli 2022). »System zur gesteuerten Erfassung des Fahrzeug-Frontfelds unter Verwendung einer strukturierten Beleuchtung durch Micro Lens Arrays«. DE 102021000724 B3.
- Yargeldi, Sinan und Anton Nelson (30. Mai 2022a). »System zur automatischen Kalibrationssteuerung von Inertialsensoren in Landfahrzeugen«. 102022001883.7.
- Yargeldi, Sinan und Anton Nelson (8. Juni 2022b). »System zur automatischen Leuchtweitenregulierung mittels Fusion multipler Signalquellen«. 102022001983.3.

- Yargeldi, Sinan, Anton Nelson und Davide Baccarin (1. Nov. 2022). »System zur automatischen Selbstkalibration eines Inertialsensors in Landfahrzeugen«. 102022128870.6.
- Yargeldi, Sinan und Max Wehle (15. Sep. 2022a). »System zur dreidimensionalen Rückfelderfassung im Fahrzeug«. DE102022002766.
- Yargeldi, Sinan und Max Wehle (22. Sep. 2022b). »System zur dreidimensionalen Seitenfelderfassung im Fahrzeug«. DE102022002767.
- Yargeldi, Sinan und Max Wehle (15. Juni 2022c). »System zur Straßenprofilerfassung und Objektdetektion unter Verwendung strukturierter Beleuchtung«. DE102022001440.

1.5. Struktur der Arbeit

Der Inhalt der Arbeit ist in 7 Hauptkapitel aufgeteilt. Zu Beginn wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der bereits in Serie verbauten und in Entwicklung befindlichen Scheinwerfertechnologien dargestellt sowie die im Einsatz befindlichen Lösungen zur Anpassung des Lichtbilds an das Fahrzeugumfeld beschrieben. Darüber hinaus wird auf weitere Informationsquellen im Fahrzeug eingegangen, die zur Lösung der gestellten Stabilisierungsaufgabe beitragen können.

Im Anschluss werden aufbauend auf diesen Informationen im Rahmen der theoretischen Betrachtungen in Kapitel 3 verschiedene Einsatzaspekte beleuchtet. Situationen, welche eine Bildstabilisierung erfordern, werden auf ihre Anforderungen hin untersucht und die Herausforderungen und Probleme für eine Bildstabilisierung dargelegt. Basierend auf diesen Untersuchungen wird ein Konzept für eine Systemkette von Umfelderkennung bis Lichtbildstabilisierung vorgestellt, auf dessen jeweilige Komponenten weiterführend im Einzelnen eingegangen wird. Das aus den entwickelten Einzelkomponenten aufgebaute Gesamtsystem ist in Abbildung 1.3 in einem Überblicksdiagramm dargestellt.

Dabei werden basierend auf einer Fahrbahnerfassung die Drehbewegungen des Fahrzeugs prädiziert und diese Informationen in Verbindung mit weiteren Sensordaten in ein Modell der Fahrzeug- bzw. Scheinwerferdynamik überführt. Die darauffolgende Projektionsstabilisierung erfolgt in zwei

1. Einleitung

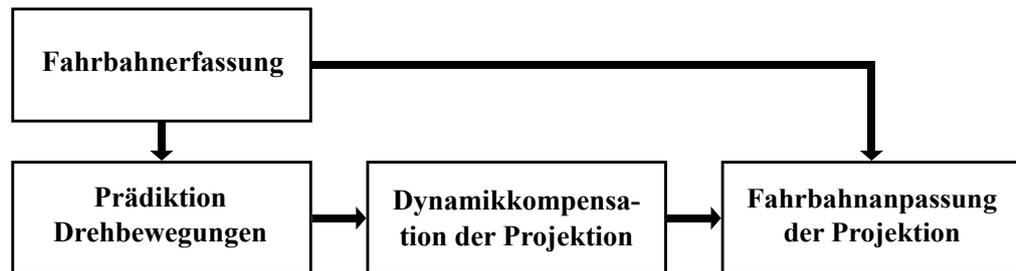


Abbildung 1.3.: Ablaufdiagramm der Einzelkomponenten im Gesamtsystem

getrennten Schritten: Zuerst wird der Einfluss der reinen Scheinwerferbewegungen kompensiert und danach die Projektion mithilfe der zuvor erfolgten Erfassung an die Fahrbahn angepasst.

Die Fahrbahnerfassung erfolgt dabei durch ein System auf Basis der strukturierten Beleuchtung, dessen Aufbau und Funktionsweise in Kapitel 4 aufgezeigt werden.

Anschließend wird in Kapitel 5 eine Prädiktion für die Messwerte des Drehratensensors eingeführt, welche benötigt wird, um die Geschwindigkeitslimitierungen der verfügbaren Hardware zu umgehen.

Bevor die Scheinwerferprojektionen jedoch stabilisiert werden können, muss das System in der Lage sein, die aktuelle Pose des Scheinwerfers zu bestimmen. Hierzu wird in Kapitel 6 eine Modellierung der Fahrzeugdynamik aufgestellt, welche als Grundlage für die Berechnungen dient. Darüber hinaus werden in Kapitel 7 eingesetzte Berechnungen und Techniken vorgestellt, welche eine korrekte und angenehme Anpassung des digitalen Projektionsbildes im Fahrzeug erlauben.

Zum Abschluss werden in Kapitel 8 alle einzelnen Systemkomponenten gebündelt zur endgültigen Projektionsstabilisierung betrachtet sowie die Ergebnisse aufgezeigt und diskutiert.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden notwendige technische und mathematische Grundlagen sowie die aktuell im Fahrzeug verbauten Systeme vorgestellt, auf welchen die Bildstabilisierung aufbauen soll. Darüber hinaus folgt ein Überblick zum Stand der Technik und es wird auf weitere Komponenten eingegangen, die für die Aufgabe relevante Signale liefern oder angrenzende Anwendungsfelder darstellen.

Zuerst wird der technische Stand und Aufbau der Fahrzeugfrontbeleuchtung beschrieben. Anschließend werden mathematische Grundlagen für die Beschreibungen bewegter Körper aufgezeigt.

2.1. Fahrzeugscheinwerfer

Um die Funktionsweise moderner Scheinwerfersysteme zu erläutern, werden im ersten Schritt der generelle Aufbau und die verwendeten Lichtquellen aufgezeigt. Anschließend werden moderne hochauflösende Lichtsysteme als Grundlage der Projektionsfunktionen präsentiert.

In folgendem Abschnitt sollen die einzelnen Teilfunktionen eines modernen Fahrzeugscheinwerfers in der Front vorgestellt und ein beispielhafter Aufbau mit den zugehörigen Komponenten vorgestellt werden. Als technische Grundlage wird hierbei der Digital Light DMD-Scheinwerfer der Mercedes-Benz S-Klasse Baureihe 223 verwendet, welcher die aktuell höchste Ausbaustufe der in Serie verbauten Lichtsysteme darstellt. Abschließend werden moderne Pixellichtsysteme vorgestellt, welche die hardwareseitige Grundlage der Arbeit bilden.

2.1.1. Lichtquellen

In diesem Abschnitt soll in Kürze die LED als in Fahrzeugscheinwerfern dominante Lichtquellentechnologie vorgestellt werden. Halogen und Xenon sind als Lichtquellen ebenfalls weit verbreitet und bekannt, werden jedoch immer mehr durch LED-Scheinwerfer verdrängt. So besitzen alle Scheinwerfer, die in dieser Arbeit betrachtet werden, bereits LEDs als einzige Lichtquellen.

Durch die rasante Entwicklung der Technologie der lichtemittierenden Dioden (LED) in den vergangenen Jahren haben sich LEDs als State-of-the-Art-Lichtquelle auch in Fahrzeugscheinwerfern etabliert. So wurde das Xenon-Licht inzwischen vollständig verdrängt und auch in niederpreisigen Fahrzeugen finden sich Scheinwerfer, die vollständig oder für Teilfunktionen auf LEDs als Lichtquelle setzen.

Das Funktionsprinzip basiert auf einem pn-Übergang bei einem Halbleiter. Im Vergleich zu normalen Dioden jedoch findet beim Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung eine aktive Rekombination der Elektronen mit den Löchern statt, welche abhängig von der Bandlücke Licht im entsprechenden Frequenzbereich emittiert. Da durch LEDs nur monochromatisches Licht erzeugt wird, ist für einen Einsatz im Fahrzeugscheinwerfer eine Weiterverarbeitung notwendig. Hierfür wird die Lumineszenz von Phosphormaterialien ausgenutzt, welche blaues Licht in breitbandigeres und langwelliges Licht im sichtbaren Spektrum umwandelt.

Da LEDs monochromatisch sind und nicht zusätzlich im Infrarotbereich abstrahlen, weisen sie eine hohe Effizienz auf. Dadurch sind sehr hohe Lichtstärken erreichbar. Ein weiterer Vorteil ist die sehr hohe Lebensdauer. Im Idealfall überstehen die Leuchten ein ganzes Autoleben und kommen ohne Wartung aus. Auch wenn die Kosten durch die fortschreitende technologische Entwicklung kontinuierlich sinken, sind sie deutlich teurer als Halogenlampen. Dies wird zum wesentlichen Teil durch die komplexere Elektronik verursacht, welche aufgrund der Stromregelung zur Steuerung notwendig ist.

Für intelligente Lichtfunktionen bieten LEDs darüber hinaus den Vorteil, einzeln ausschalt- und dimmbar zu sein. Dies geschieht wahlweise durch

eine PWM-Modulation oder durch eine Stromsteuerung, bei der die durchfließende Stromstärke variiert wird.

Verschiedene Scheinwerferausbaustufen in hochpreisigen Fahrzeugsystemen unterscheiden sich mittlerweile nicht mehr durch die eingesetzte Lichttechnologie, sondern durch die intelligenten Assistenzfunktionen und - oft miteinander gekoppelt - der gebotenen Auflösung.

2.1.2. Lichtfunktionen

Der Scheinwerfer beinhaltet eine Vielzahl verschiedener Lichtmodule und Komponenten, welche dazu verwendet werden, unterschiedliche Lichtfunktionen umzusetzen. Das wichtigste und geläufigste Beispiel dieser Funktionen ist die Ausleuchtfunktion der Straße und Umgebung vor dem Fahrzeug durch das Abblend- bzw. Fernlicht. Es ist dafür verantwortlich, bei Nacht oder schlechten Sichtverhältnissen eine sichere Orientierung in der Umgebung für den Fahrzeugführer zu gewährleisten und andere Verkehrsteilnehmer auf das eigene Fahrzeug aufmerksam zu machen. Dabei zusätzliche situationsabhängige Anpassungen möglich, um gezielt einzelne Bereiche der Umgebung auszublenden, wie bspw. durch das Teilfernlicht, oder auszuleuchten, wie bspw. durch das Kurven- und Abbiegelicht.

Eine von der Lichtstärke und dem Ausleuchtbereich her begrenzte Variante dieser Lichtverteilungen stellt das Standlicht, auch bekannt als Positions- oder Begrenzungslicht, dar. Es hat keine Ausleuchtfunktion, sondern soll das eigene Fahrzeug auch im Stand sichtbar machen. Eine Abwandlung innerorts ist das Parklicht, welches diese Signalwirkung auf die dem Verkehr zugewandte Seite beschränkt.

Das Nebellicht darf in Deutschland nur bei schlechten Sichtverhältnissen durch Niederschlag oder Nebel und nur in Verbindung mit dem Abblend- oder Standlicht verwendet werden. Meist werden hierzu separate Nebelscheinwerfer eingesetzt, welche möglichst tief verbaut sind, um Eigenblendung zu reduzieren.

Die letzte im Fahrzeugscheinwerfer integrierte Lichtfunktion sind die Fahrtrichtungsanzeiger, im allgemeinen Sprachgebrauch oft als Blinker bezeichnet.

2. Grundlagen

net. Sie informieren andere Verkehrsteilnehmer über die eigene Absicht der Fahrtrichtungsänderung und des Spurwechsels, oder wird als Teil der Warnblinkanlage im Gefahrenfall aktiviert.

Darüber hinaus gehende Lichtfunktionen werden durch weitere Kleinleuchten oder die Rücklichter am Fahrzeug umgesetzt.

2.1.3. Aufbau des Fahrzeugscheinwerfers

In Abbildung 2.1 ist das Scheinwerfersystem der Baureihe 223 dargestellt.



Abbildung 2.1.: Digital Light DMD-Scheinwerfer des Mercedes-Benz Baureihe 223
[©Mercedes-Benz AG]

Integriert sind in diesem System viele verschiedene einzelne Teilelemente, welche für die Umsetzung der verschiedenen Lichtfunktionen zuständig und in Zeichnung 2.2 dargestellt sind.

Der Scheinwerfer besteht im Wesentlichen aus sieben für Beleuchtungsfunktionen relevanten Lichtmodulen, welche die in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Lichtfunktionen umsetzen. Diese umfassen die vier Hauptmodule, welche horizontal im zentralen Bauraum des Scheinwerfers platziert sind und aus einem Grundlicht (1), einem Teilfernlicht (2), einer DMD-Matrix (3)



Abbildung 2.2.: Schematische Darstellung des DMD-Scheinwerfers mit markierten Lichtmodulen [©Mercedes-Benz AG, modifiziert]

und einem Zusatzfernlicht (4) bestehen. Weiters befindet sich im oberen Bereich des Scheinwerfers ein Kombimodul (5) in Form einer Fackel, welches als Tagfahr-, Positionslicht und Fahrtrichtungsanzeiger fungiert. Darüber hinaus befinden sich im Gehäuse zusätzlich 3 Spots (6) sowie eine Bodenbeleuchtung (7) für Signallichtfunktionen, bestehend aus dem Tagfahr- und Positionslicht.

Die vier Hauptmodule setzen sich unter anderem zusammen aus einem Grundlichtmodul für das Abblendlicht und einem Teilfernlicht-Modul als Hintergrundmatrix mit 84 Einzel-LEDs für das Abblend- und (Teil-)Fernlicht sowie Abbiege- und Kurvenlichtfunktionalitäten. Weiterhin ist ein hochauflösendes DMD-Modul mit 1,3 Millionen einzeln ansteuerbaren Pixeln als Abblend- und (Teil-)Fernlicht sowie für Symbolprojektionen verbaut. Darüber hinaus existiert ein weiteres Zusatzfernlicht-Modul, um die Ausleuchtung des Fernlichts zu optimieren.

Diese Hauptmodule sind über zwei verschiedene Tragrahmen im Gehäuse eingefasst, welche jeweils horizontal beziehungsweise vertikal rotierbar gelagert sind. Hierdurch lassen sich die Module über Stellschrauben horizontal und vertikal und über einen zusätzlich verbauten elektrischen Motor vertikal verschwenken. Die ausgestrahlten Lichtverteilungen können somit in der vertikalen Achse dynamisch auf die aktuellen Straßen- und Fahrzeuggegebenheiten angepasst werden.

2.1.4. Lichtverteilungen

Für die Ausleuchtung des Fahrzeugfrontfeldes werden je nach Umgebungsbedingungen und Verkehrssituation verschiedene Lichtverteilungen ausgestrahlt. Diese unterscheiden sich anhand der ausgesendeten Lichtstärke in einzelnen Abschnitten und den ausgeleuchteten Winkelbereichen. Für verschiedene Märkte liegen unterschiedliche Regularien vor, welche die Art und Form der erlaubten Lichtverteilungen spezifizieren und regulieren. Die ausgestrahlten Lichtverteilungen müssen Grenzwerte hinsichtlich der Helligkeit in verschiedenen Messpunkten erfüllen. Die wichtigsten Lichtverteilungen für die alltägliche Fahrt sollen nun vorgestellt werden.

Abblendlicht

Das Abblendlicht soll, wie der Name verdeutlicht, eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer verhindern, bei gleichzeitig möglichst optimaler Ausleuchtung des Fahrzeugfrontfelds. Die wichtigste Charakteristik ist daher die sogenannte Hell-Dunkel-Grenze (HDG), welche den vertikalen Übergang zwischen dem beleuchteten und unbeleuchteten Bereich darstellt. Sie ist so ausgelegt, dass sie sich auf einer Ebene mit 1% vertikalem Neigungswinkel zur Fahrzeugebene befindet.

Im aufgezeigten Scheinwerfer der Baureihe 223 wird das Abblendlicht gemeinsam aus drei Modulen erzeugt, dem Grundlicht-, Teilfernlicht- und DMD-Modul.

(Teil-)Fernlicht

Manuell oder automatisch, wenn das Fahrzeug keinen vorwärtigen Verkehr erkennt, kann das Fernlicht auf die Abblendlichtverteilung zugeschaltet werden. Das Fernlicht hat das Ziel, für eine maximale Ausleuchtung des relevanten Verkehrsraums zu sorgen.

Um diese maximale Ausleuchtung auch ohne ein Blenden anderer Verkehrsteilnehmer zu ermöglichen, besitzen neuere Fahrzeuge Teilfernlichtfunktionen, bei denen große Bereiche des Fernlichts aktiviert bleiben, andere Verkehrsteilnehmer jedoch in der Lichtverteilung ausgespart werden.

Der gezeigte Beispielscheinwerfer verwendet hierfür das verbaute Teilfernlicht- und DMD-Modul, welche aufgrund der hohen Auflösung und einzeln ansteuerbaren Pixel ein gezieltes Ausschalten der blendungsgefährdeten Bereiche ermöglichen.

Darüber hinaus ist ein Zusatzfernlichtmodul unter dem Namen Ultra Range High-Beam (URHB) verbaut, welches bei gerader Fahrbahn ohne Verkehr dazugeschaltet wird und für mehr Sichtweite sorgen soll. Es ermöglicht eine stark fokussierte Ausleuchtung der Fahrbahn in bis zu 650 Metern Entfernung, was die gesetzlich erlaubte Grenze bis 1 Lux Helligkeit darstellt.

Fernlicht-Assistenzfunktionen ermöglichen es weiterhin, die ausgestrahlte Lichtverteilung automatisch und adaptiv an die Bedingungen des Fahrzeugfrontfelds anzupassen. Um den Fahrer bei der Nutzung der Fernlichtfunktionalitäten zu unterstützen und den Einsatzzeitraum in relevanten Szenarien zu verlängern, gibt es in der Regel zwei Arten der Assistenzfunktion.

Die erste Implementationsweise ist das automatische Fernlicht, bei welchem das Fahrzeug das Ein- und Ausschalten der Fernlichtfunktion selbst übernimmt. Durch die eingebaute Fahrerassistentenkamera wird das Verkehrsgeschehen vor dem Fahrzeug ständig beobachtet und das Fernlicht bei freier Fahrbahn ohne andere Verkehrsteilnehmer eingeschaltet. Sobald sich wieder Fahrzeuge in Sichtweite befinden oder man sich in Bereichen befindet, in denen die klassische Fernlichtverteilung nicht zulässig ist (beispielsweise in Innenstädten und auf Autobahnen), wird das Fernlicht wieder automatisch ausgeschaltet.

Die zweite Form ist das sogenannte adaptive Fernlicht, auch Teilfernlicht genannt, bei welchem nicht das gesamte Fernlicht ausgeschaltet, sondern nur die Bereiche mit anderen Verkehrsteilnehmern entblendet werden. In den ersten technischen Umsetzungen wurde dies mithilfe mechanisch beweglicher Walzen erreicht, die je nach Orientierung unterschiedliche Bereiche im Lichtstrahl durch Blenden blockierten und somit zu passenden Aussparungen in der Lichtverteilung führten. Bei modernen LED-Scheinwerfern

2. Grundlagen

können Teile des Leuchtbereichs pixelweise abgeschaltet bzw. abgeblendet werden. Hierzu werden aus den Kamerabildern die Positionen der notwendigen Entblendbereiche berechnet und in auszublenkende Pixelbereiche umgerechnet.

Die Erkennung der anderen Fahrzeuge erfolgt hierbei durch die Auswertung der Kamerabilder, in welchen nach eintrainierten Lichtstrukturen gesucht wird. So sind die wichtigsten Merkmale die Rücklichter und Scheinwerfer der Fahrzeuge, welche markante Formen und Farbverteilungen aufweisen.

Grund-/Hintergrundlicht

In modernen Scheinwerfersystemen wird meist ein Grundlicht ausgesendet, welches funktionsunabhängig aktiviert ist, jedoch situationsabhängig verändert werden kann. Im Scheinwerfer der Baureihe 223 ist für diesen Zweck ein dauerhaft aktives Grundlicht im Verbund mit einer Hintergrundmatrix mit 84 LEDs verbaut, welche einzeln zu- oder abgeschaltet werden können, um die Lichtverteilung wie gewünscht abzuändern.

2.1.5. Optik

Um das durch die einzelnen Leuchtelemente, wie in Abschnitt 2.1.3. vorgestellt, erzeugte Licht den gewünschten Lichtverteilungen entsprechend auf die Fahrbahn und das Fahrzeugfrontfeld zu werfen, werden zwei verschiedene optische Systeme eingesetzt. Diese basieren entweder auf dem Reflexions- oder dem Projektionsprinzip. Die für die Arbeit relevanten hochauflösenden Lichtsysteme nie auf Reflexionssystemen basieren, werden diese zum Vergleich im Anhang aufgeführt.

Bei modernen Scheinwerfern der Mittel- und Oberklasse finden häufig Projektionssysteme Einsatz. Im Vergleich zu einfachen Scheinwerfersystemen auf Reflexionsbasis ist hier ein nachgelagertes Kunststoff- oder Glaslinsensystem dafür verantwortlich, die Lichtstrahlen in die gewünschte Lichtverteilung zu überführen. Dadurch können die Lichtstrahlen besser gebündelt und bei höher auflösenden Systemen die einzelnen Lichtpfade besser getrennt werden.

2.1.6. Pixellicht

Für weitergehende Lichtfunktionen - wie dem Fernlichtassistenten - werden Lichtsysteme benötigt, die in der Lage sind, einzelne Teile des Leuchtbereichs abzuschalten. Um die Genauigkeit dieser Funktionen und im Allgemeinen die Möglichkeiten der Lichtsteuerung zu erhöhen, ist die Anzahl und das Ausmaß der steuerbaren Lichtbereiche in den Fahrzeugscheinwerfern stetig angestiegen.

Hierbei gibt es verschiedene konstruktive Optionen, diese Steuerung vorzunehmen. Die Wichtigsten sollen hier vorgestellt werden.

Matrixlicht

Matrixlichtsysteme beinhalten eine Vielzahl an Einzel-LEDs, die für die Lichtverteilung verantwortlich sind. Dabei wird ein festgelegter Abschnitt des Gesamtausleuchtbereichs immer von einer einzelnen LED beleuchtet. Diese LEDs sind hierbei horizontal versetzt zueinander angeordnet und decken einen diskreten Winkelbereich ab. In höheren Ausführungen kann dieses Konzept in die vertikale Dimension ausgeweitet werden, indem mehrere Reihen übereinander in einer Matrixanordnung angebracht werden.

Im Multibeam-System von Mercedes-Benz werden 84 Einzelpixel für Lichtsteuerung verwendet, welche einzeln ansteuer-, dimm- und ausschaltbar sind.

Hochauflösende Lichtsysteme

Mit noch weiter steigenden Auflösungen der Scheinwerfer lassen sich die Anwendungsgebiete von reinen Ausleuchtungs- und Entblendungsfunktionen auf Interaktions- und Kommunikationszwecke ausweiten. Die auflösungstechnische Abgrenzung zum Matrixlicht ist hierbei nicht klar gegeben, jedoch existieren zwei generelle Eigenschaften, auf die bei der Kategorisierung geachtet wird: Diese sind zum einen die zugrunde liegende Technologie und zum anderen die Kantenlänge der Einzel-LEDs, gekoppelt mit der Gesamtauflösung.

2. Grundlagen

Aktuell existieren vor allem drei verschiedene Technologien mit einem hohen Reifegrad und Serientauglichkeit. Diese sind das DMD, die μ LED und das LCD. Technisch betrachtet sind bestimmte Technologien wie DMD und LCD fest mit einer hohen Auflösung verknüpft. Bei additiven Systemen mit Einzel-LEDs wie die μ LED wird meist eine maximale Kantenlänge der einzelnen Leuchtelemente als Voraussetzung für eine Einteilung als hochauflösendes System gesehen.

So sollten hochauflösende Systeme allgemein in der Lage sein, Piktogramme erkennbar in die Umgebung zu projizieren. Die hierfür notwendige Auflösung unterscheidet sich jedoch mitunter deutlich zwischen verschiedenen Scheinwerferaufbauten. So ist die Projektionsgüte streng mit der Winkelauflösung gekoppelt, also dem Winkelbereich den ein einzelner Pixel bestrahlt, welche vom Linsensystem festgelegt wird. In typischen Anwendungsszenarien und Fahrzeugausleuchtbereichen, bei denen das hochauflösende System auch Aufgaben im Abblend- und Fernlichtbereich übernimmt, wird oft ein Winkelbereich zwischen $4 - 8^\circ$ vertikal und $10 - 16^\circ$ horizontal abgedeckt, bei Systemen mit einer Auflösung von etwa 16.000 Pixeln und höher. Nimmt man diese Seriensysteme als Basis, kann eine Untergrenze der Winkelauflösung klassischer hochauflösender Systeme auf etwa 50 Milligrad definiert werden.

Durch diese hohen Winkelauflösungen lassen sich selbst detaillierte Symbole auf der Fahrbahn darstellen. Der Projektionsort ist hierbei, aufgrund der Sichtbarkeit für den Fahrer, auf einen Bereich von 8 bis 18 Metern von der Fahrzeugfront begrenzt. In Abbildung 2.1 ist eine solche, den Fahrer unterstützende, Projektion in einem Baustellenszenario dargestellt.

In den High-End-Systemen finden aktuell vor allem die DMD- und μ LED-Technologie Einsatz, die sich in ihrem Aufbau grundlegend unterscheiden. Da technische Versuchsplattform auf einem μ LED-Scheinwerfer basiert, soll diese Technik in Kürze vorgestellt werden. Details zum DMD-System können dem Anhang entnommen werden.

μ LED μ LED Scheinwerfer erzeugen ihre hohe Auflösung durch eine Vielzahl einzeln ansteuerbarer LEDs, die in einem Array angeordnet sind. Im Vergleich zu Matrixlicht-Systemen wie dem Multibeam, bei dem 84 räumlich



Abbildung 2.3.: Fahrspurprojektion im Baustellen-Szenario [©Mercedes-Benz AG]

getrennte LEDs angesteuert werden, befinden sich hier die Lichtquellen auf einem einzigen Chip. Es existiert keine feste Definition der Größe von μ LEDs, jedoch wird meist ab einer Kantenlänge von $<100\ \mu\text{m}$ davon gesprochen. Ein beispielhafter μ LED Chip ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Die Einzel-LEDs werden per PWM angesteuert, um die Helligkeit zu variieren und das ausgestrahlte Lichtbild entsprechend anzupassen. Im Vergleich zur DMD-Technologie erzeugen aktuelle Systeme hier jedoch geringe Auflösungen, so besitzt der dargestellte Chip 1024 einzelne Lichtquellen. Im Vergleich zum DMD besitzt die μ LED-Technologie aber bei den meisten Anwendungen einen signifikanten Kostenvorteil und ist in Teillichtsituationen, bei welchen ein großer Teil des Leuchtbereichs nicht benötigt wird, effizienter, da Pixel komplett ausgeschaltet und nicht nur abgeblendet werden. Dieser Vorteil kann sich jedoch in vollen Fernlichtsituationen umkehren, da im DMD auf Effizienz optimierte Hochstrom-LEDs verwendet werden können, welche einen geringeren elektrischen Verbrauch bei gleicher Be-

2. Grundlagen

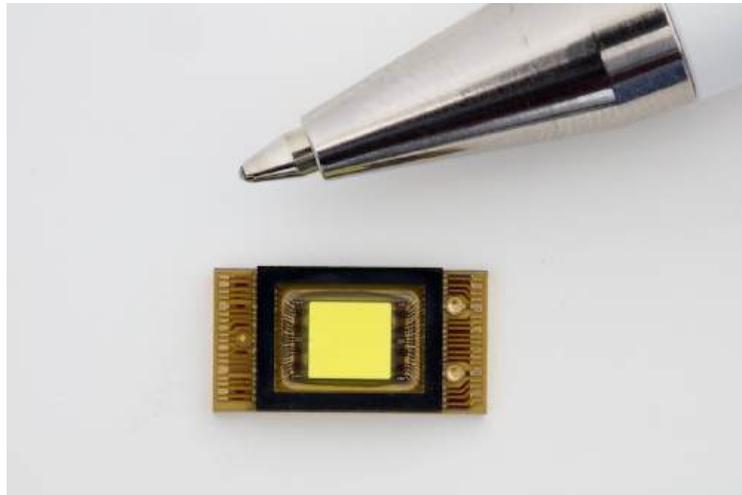


Abbildung 2.4.: Größendarstellung eines μ LED-Chips [©Mercedes-Benz AG]

leuchtungsstärke bieten.

Die Technologie wurde im Rahmen der μ AFS (Advanced Frontlighting System)-Initiative in Deutschland staatlich gefördert und befindet sich in rasanter Entwicklung, sodass sich bereits Systeme mit einer Auflösung von über 20.000 Pixel kurz vor dem Serieneinsatz befinden. Zudem sind Weiterentwicklungen im Bereich größer als 50.000 Pixel in Arbeit und befinden sich in einem fortgeschrittenen Stand. Durch diese Entwicklungen werden in Zukunft auch μ LED-Systeme in der Lage sein, hochaufgelöste Symbole darzustellen.

Erste Versuchssysteme besitzen ein 4:1-Bildverhältnis mit einem Abstrahlbereich von 6° vertikal und 24° horizontal. Die Abstrahlcharakteristik ist dabei erneut winkelhomogen. Da mehrere verschiedene Unternehmen μ LED-Systeme entwickeln, sind Chips mit verschiedenen Auflösungen vorhanden. Diese besitzen eine Auflösung von entweder 64×256 oder alternativ 80×320 Pixel. Folglich ergibt sich eine reduzierte Winkelauflösung von $\frac{6^\circ}{64 \text{ Pixel}} = 93,8 \frac{\text{m}^\circ}{\text{Pixel}}$, beziehungsweise $\frac{6^\circ}{80 \text{ Pixel}} = 75 \frac{\text{m}^\circ}{\text{Pixel}}$. Bei planarer Projektion bedeutet dies eine 2-3-fache Kantenlänge pro Pixel und eine 4 bis 9-fache Leuchtfläche pro Pixel.

2.1.7. Projektionen

Wie in Abschnitt 2.1.5 aufgezeigt, stellen bei modernen Scheinwerfern jegliche Lichtverteilungen, wie auch das Abblendlicht, Projektionen dar, da sie durch eine projektive Abbildung im Scheinwerfer entstehen. Im Kontext der Scheinwerfer bezieht sich der Begriff jedoch vor allem auf die Fähigkeit, feine Strukturen wie Symbole oder Muster auf die Straße oder die Umgebung zu projizieren. Diese dienen entweder dazu, den Fahrzeugführer über Gegebenheiten zu informieren oder die Aufmerksamkeit auf bestimmte Teilbereiche in der Umgebung zu lenken. Klassische Beispiele, die von vielen Fahrzeugherstellern verwendet werden, sind Fahrspurmarkierungen und Gefahrenwarnungen wie Baustellenwarnungen. Weiterhin können andere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Fahrradfahrer durch Animationen oder erhöhte Lichtstärken markiert werden, was als Spotlight-Funktion bezeichnet wird. Darüber hinaus können Projektionen aber auch Funktionen für andere Verkehrsteilnehmer haben, in dem diese auf bestimmte Verhaltensweisen des Fahrers hinzuweisen. So kann beispielsweise durch animierte Projektionen oder Pfeile die eigene Spurwechselabsicht angezeigt werden.

Damit lassen sich die Projektionen in zwei Hauptbereiche einteilen. Die Symbolprojektionen, die aufgrund der feinen Struktur nur durch hochauflösende Scheinwerfer erzeugt werden können, und Markierungsprojektionen, die auch durch niedrigere Auflösungen umsetzbar sind. Um diese Unterscheidung klar und verständlich zu machen, wird ab jetzt von Musterprojektionen gesprochen, wenn beide Projektionsformen gemeint sind.

Die Symbole können ebenfalls in zwei weitere Gruppen eingeteilt werden, abhängig von der abgezielten Projektionsfläche. Den großen Teil stellen dabei die Bodenprojektionen dar, welche auf die Fahrbahn vor dem Fahrzeug geworfen werden. Ein Beispiel hierfür ist auch die in Abbildung 2.3 dargestellte Spurprojektion. Darüber hinaus gibt es Wandprojektionen, vor allem für Inszenierungsfunktionen, beispielsweise Coming-Home- und Leaving-Home-Animationen. Ein entsprechendes Beispiel ist im unteren Abschnitt der Abbildung 2.5 dargestellt. Wandprojektionen sind nicht von Bedeutung für die Stabilisierungsaufgabe, da diese nur statisch im Fahrzeugstand

2. Grundlagen



Abbildung 2.5.: Digitales Bild der Projektion und die tatsächliche Darstellung durch ein μ LED-System auf einer weißen Wand

projiziert werden und die Symbole bereits entsprechend dafür optimiert sind.

Lange waren die bei den Bodenprojektionen verwendeten Symbole nicht international genormt, weshalb die einzelnen Fahrzeughersteller unterschiedliche Symboliken für dieselben Warn- und Hilfssymbole im Einsatz hatten, oft mit Sondergenehmigungen für die einzelnen Formen. Inzwischen ist durch die UN-ECE eine Regelung für Standardsymbole wie z. B. eine Baustellenwarnung gegeben.

Die Darstellung der Projektionen unterscheidet sich teilweise deutlich bei unterschiedlichen Oberflächentexturen. Ein wichtiger intrinsischer Faktor bei der Projektionsqualität ist das optische System des Scheinwerfers, welches zu Weichzeichnungen, Farbfehlern und Überlagerungen von Einzelpixeln führen kann. Beispielhaft ist in [Abbildung 2.5](#) ein Baggersymbol und seine Projektion auf eine weiße Wand durch ein μ LED-System dargestellt.

Eindeutig zu erkennen ist der durch die nichtideale Optik verursachte Farbsaum, entstanden durch die Dispersion der unterschiedlichen Wellenlängen im weißen Scheinwerferlicht. Weiterhin entsteht ein Übersprechen der Einzelpixel, wodurch die Kanten weichgezeichnet und Zwischenbereiche, in denen die Pixel ausgeschaltet sind, überleuchtet werden. Darüber hinaus ist eine zusätzliche Eigenheit hochauflösender Systeme zu erkennen. Durch

Pixelfehler in der LED-Matrix leuchten einzelne Bereiche nicht, was im Bild als Darstellungsfehler im oberen Bereich des Kettenwerks zu erkennen ist.

2.1.8. Steuerung der Lichtverteilung

Um eine Stabilisierung der projizierten Lichtverteilung durchführen zu können, muss entweder die Abstrahlrichtung des Lichts im Scheinwerfer verdreht werden oder das ausgesandte Lichtbild manipuliert werden, um der Scheinwerferbewegung entgegenzuwirken. In bisherigen Scheinwerfersystemen wird, mit der Ausnahme der Abschaltung von kompletten Pixelbereichen aufgrund von Kamerainformationen, nur eine rein mechanische Steuerung des Lichtbilds verwendet. Wie in Abschnitt 2.5 aufgezeigt, können durch hochauflösende Systeme diese Steuerungsaufgaben auch rein digital auf der Pixelmatrix erfolgen.

Mechanisch

Für die Umsetzung verschiedener intelligenter Lichtfunktionen wird der Abstrahlwinkel des Lichts mechanisch durch eine Verdrehung des Lichtmoduls in vertikaler Richtung im Scheinwerfer geregelt.

Für die Ansteuerung der Sollposition wird durch den verbauten Schrittmotor eine Spindel in Längsrichtung der Motorachse aus- und eingefahren. Über eine Umlenkmechanik werden dadurch der gesamte interne Tragrahmen oder einzelne Lichtmodule verschwenkt. Mechanisch werden diese Aufbauten so ausgelegt, dass eine Motorumdrehung einen fixen Verstellweg der Spindel verursacht, welcher wiederum einen gleichbleibenden Drehwinkel der Leuchteinheiten verursacht. Damit ist eine direkte Verknüpfung zwischen Motorschritten und dem verursachten Verstellwinkel gegeben, welcher für die abgezielte Steuerung benötigt wird.

Dieser gesamte Verstellvorgang unterliegt jedoch durch die lange Signalkette und dem Aktor einer Verzögerung, die auf diese Weise eine Kompensation hochdynamischer Bewegungen unmöglich machen, falls diese nicht im Voraus bekannt ist. Weiterhin sind die anfahrbaren Positionen und damit die Auflösung der Winkelpositionierung durch die minimal ansteuerbare

2. Grundlagen

Schrittweite des Motors und die im Scheinwerfer verbaute Mechanik begrenzt. Verbreitet werden elektronische Treiber mit Sechzehntelschritten verbaut, welche über die Mechanik etwa 500 Schritte pro Grad Neigung des Lichtbildes ermöglichen.

Dennoch weist die mechanische Verstellung den Vorteil auf, keinen Teil des Leuchtbereichs für eine entsprechende Positionskorrektur opfern zu müssen. Die einzelnen Lichtmodule werden komplett verdreht, ohne eine Verschattung oder Verdeckung einzelner Leuchtbereiche. Für eine möglichst unauffällige Arbeitsweise des Stabilisierungssystems sollen diese Möglichkeiten deshalb nicht ungenutzt bleiben, um in allen Situationen einen maximal großen Bereich des Lichtbilds zu erhalten.

Für die Integration in Fahrzeugscheinwerfern finden überwiegend Schrittmotoren Verwendung. Der Schrittmotor kann seine Ausfahrweite schrittweise verändern, was ihm seinen Namen gibt. Ermöglicht wird das durch einzeln ansteuerbare äußere Magnetfelder, die den Stator bilden. Durch eine entsprechende Verstellung der Magnetfeldpolaritäten und -stärken kann der Rotor in die gewünschte nächste Winkelposition verdreht werden. Die Schrittweite ist dabei abhängig von der Anzahl an Wicklungen im Stator und der Anzahl an Stufen, mit denen die Magnetfeldstärken angesteuert werden können.

Im laufenden Betrieb kann es bei Schrittmotoren zu Schrittfehlern kommen, bei denen nicht korrekt mitgezählt wird oder die Ansteuerung mehr oder weniger Schritte als gewollt anfährt. Dies geschieht bei einem zu hohen Lastmoment oder zu hohen Geschwindigkeiten, bei welchen der Rotor den Magnetfeldern nicht mehr korrekt folgen kann. Im Laufe der Zeit können sich diese zu einem großen Winkelfehler bei der Scheinwerferorientierung aufsummieren. Um diesem Fehler entgegenzuwirken, werden im Scheinwerfer Referenzierungsläufe durchgeführt, beispielsweise während der Aufwachphase des Fahrzeugs. In dieser wird keine korrekte Ausleuchtung benötigt, und der Schrittmotor wird von der aktuellen Position gegen seinen mechanischen Anschlag maximal ein- bzw. ausgefahren. Damit ist die aktuelle Orientierung des Scheinwerfers durch die bekannte mechanische Konstruktion eindeutig bestimmt. Anschließend kann über das bekannte Verhältnis zwischen Schrittweite und resultierendem Verstellwinkel die letzte im Steuergerät eingespeicherte Sollposition angefahren werden.

Unabhängig von der Bauform des Motors erfolgt eine mechanische Ansteuerung nie instantan. Die notwendige Verstellzeit ist darüber hinaus auch nicht konstant, sondern stellt eine Funktion des Verstellwegs dar. Aufgrund von Haltbarkeitsgründen und um Schrittverluste zu minimieren ist die Verstellgeschwindigkeit der Motoren aber auf einen festen Wert beschränkt. Zusätzlich ist aus denselben Gründen die Leuchtweitenregulierung in ihrer Dynamik softwareseitig eingeschränkt, so dass das Ansteuersignal für die Schrittmotoren tiefpassgefiltert wird. Diese Geschwindigkeits- und Frequenzwerte sind je nach Fahrzeughersteller unterschiedlich, aber für jedes System eindeutig definiert. Dieser Umstand kann ausgenutzt werden und als Grundlage für die korrekte Einbettung in das Gesamtsystem der Projektionsstabilität verwendet werden, indem die Regelbereiche für die digitale und mechanische Kompensation getrennt werden.

Zwei im Serieneinsatz befindliche Verfahren, welche eine direkte mechanische Kompensation der Fahrzeuglage und der -bewegungen durchführen, werden nun aufgezeigt:

Automatische Leuchtweitenregulierung Bei einem Lichtstrom von mehr als 2000 Lumen ist nach der europäischen Verordnung ECE48 eine automatische Leuchtweitenregulierung (LWR) vorgeschrieben, um ein mögliches Blenden des Gegenverkehrs zu verhindern. Diese LWR sorgt bei einem Nicken des Fahrzeugs gegenüber dem Grundzustand dafür, den Lichtkegel entsprechend vertikal nach oben oder unten zu korrigieren und die Leuchtweite möglichst konstant zu halten.

Die Nickbewegungen entstehen dynamisch durch Beschleunigungskräfte und Straßenanregungen oder statisch durch Beladungsänderungen des Fahrzeugs. Der Nickzustand des Fahrzeugs wird hierbei zumeist von Achsensensoren erfasst, welche die Einfederungen der Karosserie messen und aus welchen anschließend ein Nickwinkel sowie die Eintauchtiefe der Scheinwerfer berechnet werden. Mit Hilfe dieser Werte wird der notwendige Verstellwinkel der Leuchteinheit bestimmt, um die Leuchtweite im Nullzustand wiederherzustellen. Der anschließende Regelvorgang selbst erfolgt auch bei hochauflösenden Scheinwerfersystemen rein mechanisch, indem durch einen Schrittmotor im Scheinwerfer die Leuchteinheit entsprechend verdreht und der Sollwinkel angesteuert wird.

2. Grundlagen

Topographieausgleich Eine weitere Funktion, die sich bereits im Einsatz befindet, ist der Ausgleich des Einflusses des topographischen Verlaufs der Fahrstrecke auf den Leuchtbereich der Scheinwerfer.

Je nach An- und Abstiegsverlauf der sich vor dem Fahrzeug befindlichen Strecke kann es zu einer deutlich verringerten Leuchtweite oder einem Blenden des Gegenverkehrs kommen. Fährt ein Fahrzeug z. B. auf den Beginn eines steilen Anstieges zu, so fällt der Lichtkegel der Scheinwerfer bereits in kurzer Distanz auf die Straße, und weiter vorausliegende Bereiche werden nicht mehr ausgeleuchtet. Auch der umgekehrte Fall stellt eine Sicherheitseinschränkung dar: Steht das Fahrzeug auf einer Kuppe, so scheinen die Scheinwerfer im Vergleich zur Fahrbahn um den nachfolgenden Abstiegswinkel verdreht nach oben, wodurch entgegenkommender Verkehr geblendet werden könnte.

Um in diesen Situationen reagieren zu können, muss die Topografie der befahrenen Strecke bekannt sein. Diese Informationen werden über hochgenaue Kartendaten erhalten, die für Punkte in bestimmter Entfernung des Fahrzeugs die Steigung der Fahrbahn liefern können. Aus mehreren dieser Punkte auf der Strecke, die vom Fahrzeug in der nachfolgenden Zeit mit der größten Wahrscheinlichkeit befahren werden wird, kann ein Höhenprofil erstellt werden. Mit Hilfe dessen lässt sich letztendlich die Leuchtweite anpassen, um für eine optimale und verkehrssichere Ausleuchtung zu sorgen. Da diese Anwendung keine zeitkritischen Komponenten beinhaltet, reicht auch hier die Verstellung per Schrittmotor aus.

Digital

Der Vorteil der neueren hochauflösenden Scheinwerfervarianten ist, dass man einzelne Bereiche der Beleuchtung gezielt abschalten oder sogar die Intensität des Lichts verändern kann. Stellt man sich die Lichtverteilung der in den Abschnitten zuvor beschriebenen Systeme als Matrix mit einzelnen Pixeln vor - entweder realisiert durch ein Mikrospiegel-Array im DMD-Scheinwerfer oder einzelnen LEDs im μ LED-Scheinwerfer -, so kann man die Bewegung des Fahrzeugs und damit der Scheinwerferleuchtposition kompensieren, indem das projizierte Symbol entsprechend auf der Matrix verschoben wird, wie in Fig 2.6 dargestellt.

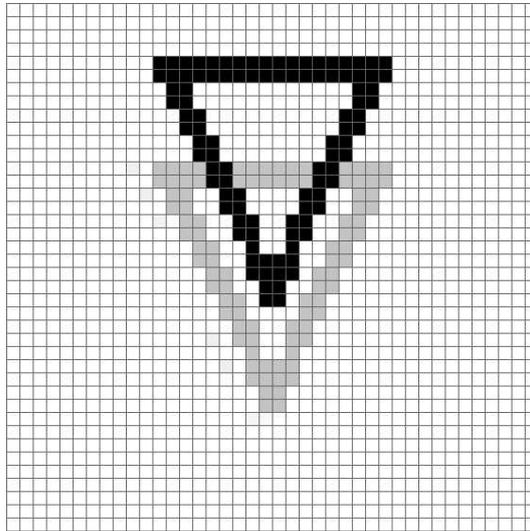


Abbildung 2.6.: Korrektur der Symbolposition im Nickfall

Hier wird die Projektion eines Dreiecksymbols betrachtet. Beim Abnicken des Fahrzeugs, also einem Absinken der Fahrzeugfront, muss die vorherige Nullposition des Symbols, dargestellt in Grau, zum Beibehalten des Projektionsorts auf der Fahrbahn zur neuen Position, dargestellt in Schwarz, verschoben werden. Dadurch wird die Winkeländerung der Scheinwerferorientierung durch eine entsprechende Änderung des Ausleuchtungswinkels kompensiert.

In dieser vereinfachten Betrachtung sind jegliche Verzerrungseffekte, wie beispielsweise verursacht durch den unterschiedlichen Winkel zur Beleuchtungsfläche, nicht berücksichtigt. Dieser Effekt muss durch eine entsprechende Transformation des Symbols ausgeglichen werden. Werden alle Bewegungsmöglichkeiten des Scheinwerfers in Betracht gezogen, so ergibt sich die Notwendigkeit einer mehrstufigen Bearbeitung der ausgestrahlten Lichtverteilungen. Diese rechenintensiven Kalkulationen müssen in einem Bildgenerierungsschritt vor dem Ausstrahlen durchgeführt werden. Diese digitale Regelung kann dann, falls die Daten rechtzeitig in die Bildgenerierung eingespeist werden, sofort zum nächsten Frame des Lichtbildes auf die neuen Bedingungen reagieren. Das bedeutet, dass die Reaktionszeit im ersten Schritt allein durch die Framerate begrenzt ist, was bei der Bildwie-

2. Grundlagen

derholrate von 60 Hz einer maximalen Reaktionsverzögerung von 16,7 ms entspricht.

Die Auflösung dieser digitalen Stabilisierung ist jedoch, wie in der Beispieldarstellung aufgezeigt, abhängig von der Auflösung des verwendeten Beleuchtungssystems. Bewegungen können nur über einzelne Pixelsprünge auf dem Bildarray korrigiert werden. In dem aktuellen Systemaufbau auf μ LED-Basis deckt jeder Bildpixel einen Winkelbereich von etwa $0,1^\circ$ ab. Dieser Größenbereich ist mit bloßem Auge zu erkennen, weshalb es zu wahrnehmbaren Positionssprüngen kommen kann. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, kann wie in Abschnitt 2.5.4 aufgezeigt auf eine entsprechende Filterung der Darstellung zurückgegriffen werden.

Ein bedeutender Nachteil der digitalen Stabilisierung ist der begrenzte Regelbereich, der durch den Leuchtbereich des Pixelsystems beschränkt wird. Der vertikale Ausleuchtbereich beträgt beim μ LED-System 6° . Der typische Nickbereich eines Fahrzeugs beträgt zum Vergleich etwa 5° . Tatsächlich wird also, wenn zusätzlich der für die Symboldarstellung nötige Winkelbereich beachtet wird, beinahe der gesamte Ausleuchtbereich bereits für eine perfekte theoretische Stabilisierung benötigt. Dies macht die zeitgleiche Verwendung des mechanischen Einstellbereichs zwingend erforderlich, falls auch Extremsituationen abgedeckt werden sollen.

Im tatsächlichen Stabilisierungsbetrieb spielt dies bei Symbolen vor allem bei einem negativen Nickwinkel, also einem „Auftauchen“ der Fahrzeugfront eine Rolle, da die Symbolprojektion auf die Straße im Nullzustand die unteren Pixelbereiche des physischen Lichtsystems verwendet. Muss das Symbol nun nach unten korrigiert werden, so ist der nutzbare freie Pixelbereich „unterhalb“ des Symbols begrenzt und die Symbolbewegung kann nicht mehr aufgefangen werden.

Im entworfenen System zur Projektionsstabilisierung wird deshalb die parallele mechanische Verstellung mitgenutzt, um den Regelbereich der digitalen Lichtverteilungsanpassung zu verbessern.

2.2. Fahrdynamik

Für die Stabilisierung der Scheinwerferprojektionen ist die korrekte Erfassung der Scheinwerferbewegung eine Grundvoraussetzung. Aus diesem Grund benötigen die im Laufe der Arbeit erfolgenden Betrachtungen ein grundlegendes Verständnis der mathematischen Zusammenhänge, die hinter den Fahrzeugbewegungen und den dadurch beeinflussten Scheinwerferprojektionen liegen.

Da sich die genutzten Notationen und Bezeichnungen teilweise stark je nach verwendeter Literatur unterscheiden, sollen in diesem Kapitel die verschiedenen innerhalb der Arbeit genutzten Systeme und Konventionen eingeführt und erörtert werden. Hierzu wird zuerst die verwendete algebraische Notation eingeführt und anschließend die verschiedenen Koordinatensysteme aufgeführt, welche im Fahrzustand vorliegen und für die Beschreibung der Lage und Dynamik verwendet werden. Abschließend wird eine Übersicht der verschiedenen Möglichkeiten der Fahrdynamikerfassung gegeben.

2.2.1. Algebraische Notation

Für die Vielzahl an 2- und 3D-Transformationen, die an den entsprechenden Stellen verwendet werden, ist eine durchgehend klare und logische Notation notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierbei durchgängig die nachfolgend beschriebene Notation angewandt:

Fette Kleinbuchstaben stellen Vektoren \mathbf{v} und fette Großbuchstaben Matrizen \mathbf{M} dar. Falls nicht explizit erwähnt, sind Vektoren in Form eines Spaltenvektors dargestellt. Runde Klammern markieren Vektoren, während eckige Klammern für Matrizen stehen. Skalare T, s werden in einer kursiven Schriftweise notiert. Homogene Koordinaten $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x} \ \tilde{y} \ \tilde{w}) = \tilde{w} (x \ y \ 1) = \tilde{w}\mathbf{x}$ werden durch eine zusätzliche Tilde gekennzeichnet. Eine Ausnahme der generellen Notation sind Koordinaten, die in einem beliebigen Weltkoordinatensystem definiert sind, da diese explizit durch den fetten Großbuchstaben $\mathbf{X} = (\tilde{X} \ \tilde{Y} \ \tilde{Z} \ \tilde{W})$ beschrieben werden. Für eine bessere Übersicht und

2. Grundlagen

Lesbarkeit wird weiterhin auf einen Eintrag von Nullelementen verzichtet. Ein Beispiel diesbezüglich sei die Matrix:

$$\begin{bmatrix} f & & \\ & f & \\ & & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2.2. Fahrzeugbewegungen

Die Veränderung der Darstellung der Scheinwerferprojektionen ist eine Folge der Veränderung der Scheinwerferposition und -orientierung über der Fahrbahn, die als Projektionsfläche dient. Um diese Änderungen mathematisch beschreiben zu können, ist eine Kenntnis der möglichen Bewegungen und der existierenden Freiheitsgrade erforderlich. Durch die gefederte Aufhängung der Fahrzeugkarosserie kann diese ihre Position und Orientierung relativ zum Fahrwerk und zur Fahrbahn verändern. Diese Variationen der Pose werden durch Kräfte verursacht, welche auf die Karosserie wirken, und können dabei eine Vielzahl unterschiedlicher Ursachen wie interne Antriebs- und Bremsmomente oder externe Fahrbahnanregungen und Krafteinwirkungen haben.

Es existieren insgesamt drei rotatorische und drei translatorische Freiheitsgrade der Bewegung, wie in Grafik 2.7 dargestellt.

Die Rotationen setzen sich zusammen aus dem Wanken um die Fahrzeuglängsachse, dem Nicken um die Fahrzeugquerachse und dem Gieren um die Fahrzeughochachse. Die Translationen setzen sich zusammen aus dem Zucken entlang der Längs-, dem Schieben entlang der Quer- sowie dem Huben entlang der Hochachse. Die Wahl des spezifischen Koordinatensystems und der Zusammenhang der Bewegungen mit den spezifischen Achsen wird im folgenden Abschnitt genauer erörtert.

2.2.3. Koordinatensysteme

Um aus den verschiedenen Signaleingängen, welche im Fahrzeug verfügbar sind, eine konsistente Beschreibung der Fahrzeugorientierung und Lage zu

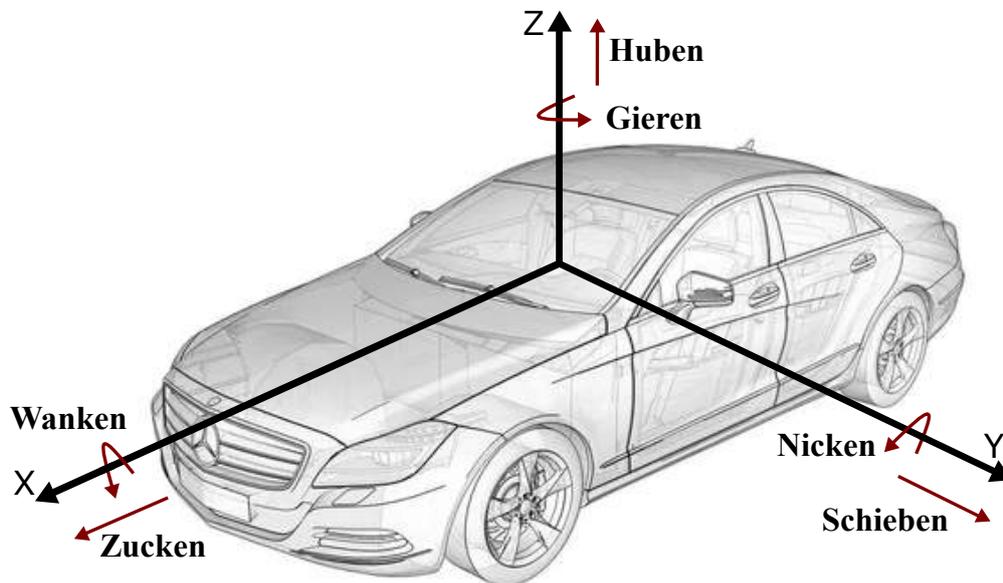


Abbildung 2.7.: Darstellung der Bewegungen im fahrzeugfesten KS [©Mercedes-Benz AG, modifiziert]

erhalten, welche als Basis für die Anpassung der Lichtverteilung für den Zweck der Stabilisierung dienen, ist eine klare Festlegung der genutzten Koordinatensysteme (KS) notwendig. Darüber hinaus muss diese Beschreibung geeignet sein, diese Pose in Referenz zur Erde und Fahrbahn darzustellen, um verschiedene äußere Einflüsse in den Berechnungen berücksichtigen zu können.

Um eine vollständige, aber dennoch schlichte und einfach handhabbare Beschreibung zu erhalten, werden mehrere verschiedene Bezugssysteme eingeführt. Den Anfang machen hierbei die in der DIN ISO Norm 8855 für den Automobilbau definierten und weit verbreiteten Grundsysteme, welche durch problemspezifische Koordinatensysteme ergänzt werden. Alle KS stellen dabei ein rechtshändisch-kartesisches System dar.

2. Grundlagen

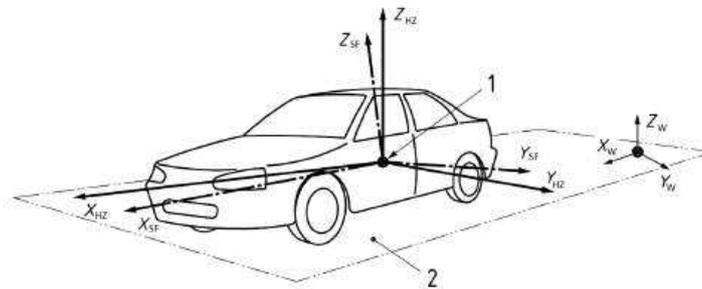


Abbildung 2.8.: Übersicht der drei in der DIN ISO 8855 [Standardization, 2011] definierten Bezugssysteme. Das Rotationszentrum des Fahrzeugs (1) und die Horizontalebene (2) sind zusätzlich markiert.

DIN ISO 8855

In 2.8 sind alle drei in der DIN ISO Norm definierten KS am Fahrzeugbeispiel dargestellt. Die einzelnen Systeme sollen nun vorgestellt werden.

Weltkoordinatensystem Das erste KS und wichtigste Referenzsystem ist das Weltkoordinatensystem, welches in Bezug zur Erde definiert ist. Dabei läuft die z-Achse parallel und entgegengerichtet zum Vektor der Erdgravitation. Die x- und y-Achsen spannen gemeinsam die Grundebene auf.

Durch diese Eigenschaften ist das KS jedoch nicht eindeutig definiert, da es frei um die z-Achse drehbar ist. Die Richtung der x- und y-Achse kann somit den Anforderungen entsprechend willkürlich gewählt werden, weshalb automobilspezifisch die x-Achse stets in Fahrtrichtung des Fahrzeugs gelegt wird, um Längs- und Querkräfte jeweils möglichst auf die x- und y-Achse aufzuteilen.

In der Grundsituation, bei der ein Fahrzeug still im Grundzustand auf einer Fläche mit einem Normalenvektor parallel zur Erdgravitation steht, entstehen hierdurch wünschenswerte Eigenschaften. So kann die wirkende Erdbeschleunigung mit nur einer Komponente durch den Vektor $[0 \ 0 \ g]^T$ beschrieben werden und Längsbeschleunigungen a durch $[a \ 0 \ 0]^T$. Diese

Aufteilung kann in dynamischen Situationen für die Fahrzeugbeschleunigungen jedoch nicht aufrechterhalten werden, da die Fahrzeugachsen nicht mehr kongruent zu den Achsen des KS sind. In diesem Fall entsprechen die x - und y -Achsen einer Projektion der Fahrzeugachsen auf die durch die Gravitation als Normalenvektor definierte Horizontalebene.

Um diese fehlende Kopplung zum Fahrzeug herzustellen, sind deshalb weitere KS notwendig.

Straßen- bzw. Horizontiertes Koordinatensystem Das Horizontierte KS ist eine angepasste Beschreibung mit Fokussierung auf die Fahrbahn. Sie stellt ein rotiertes Weltkoordinatensystem dar, bei dem die x - y -Ebene nun parallel zur Fahrbahn aufgespannt ist. Dabei wird die Ebene durch die Aufstandspunkte der Fahrzeigräder auf der Fahrbahn aufgestellt, wodurch es bei gekrümmten Fahrbahnen möglich ist, dass die tatsächlich vorliegende Straße beziehungsweise der Untergrund die x - y -Ebene schneiden. Dadurch können sich leichte Unterschiede zum Straßen-KS ergeben, welches durch eine x - y -Ebene parallel zur idealisierten Straßenebene definiert ist. Die Kinematik der Reifen ist jedoch in den meisten Fällen unerheblich, weshalb die Unterschiede vernachlässigbar sind.

Die Richtungen der x - und y -Achsen entsprechen dabei direkt der Orientierung des Fahrwerks und liefern durch die Fahrbahnbezogenheit ein intuitives Referenzsystem für die Beschreibung der Fahrzeugdynamik, da die klassische Definition der Fahrzeuglage wie Nicken und Wanken ebenfalls fahrbahnbezogen ist. Hierdurch können eine Längsbeschleunigung a und eine Querbeschleunigung b zu jeder Zeit durch den Vektor $[a \ b \ 0]^T$ beschrieben werden.

In 2.9 sind diese Sachverhalte am Beispiel einer Fahrbahn aufgezeigt.

Fahrzeugfestes Koordinatensystem Das Fahrzeugkoordinatensystem besitzt ein Achsensystem, welches direkt mit der gefederten Fahrzeugmasse und der Karosserie gekoppelt ist. Im Vergleich zum Welt- und Straßen-KS sind die einzelnen Achsen direkt an die Karosserieorientierung gebunden

2. Grundlagen

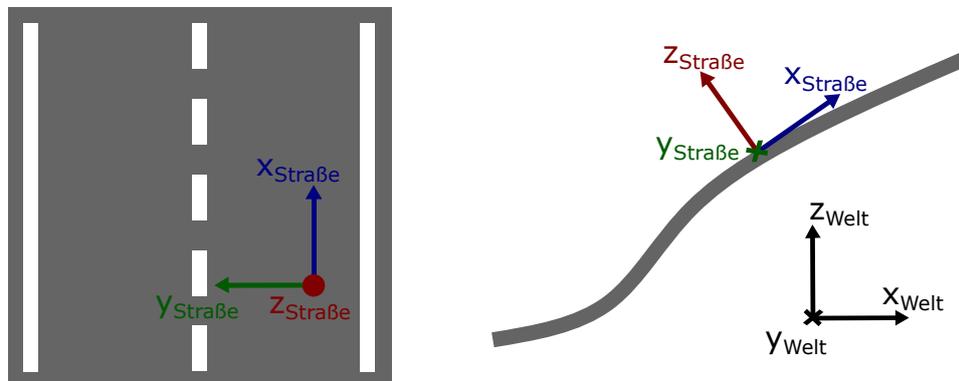


Abbildung 2.9.: x-y und x-z Ebenen des Straßen-KS

und besitzen somit keinerlei direkte Kopplung mit den typischerweise auftretenden Kräften der Gravitation und Fahrzeugbeschleunigungen.

Der Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems befindet sich ebenso wie der des Horizontierten KS im Rotationszentrum der gefederten Fahrzeugmasse.

Weitere Zwischensysteme

Neben diesen für die Stabilisierungsbetrachtungen essenziellen Koordinatensystemen gibt es noch drei weitere Systeme, welche nicht direkt in der ISO 8855 definiert sind, jedoch für die Beschreibung und Lösung des Stabilisierungsproblems verwendet werden. Dabei ist das Scheinwerferkoordinatensystem eine spezielle Adaption auf die tatsächliche Scheinwerferpose. Die beiden weiteren Systeme sind für die Beschreibung der Dynamik zwischen dem Straßen- und Fahrzeugkoordinatensystem von Bedeutung und finden Verwendung in Zwischenberechnungen. Sie sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Scheinwerferkoordinatensystem

Dieses Koordinatensystem stellt eine angepasste Version des Fahrzeugfesten KS dar und wird für Betrachtungen der Scheinwerferbewegungen erstellt, um Berechnungen zu vereinfachen.

Es ist weitestgehend am Fahrzeugfesten KS orientiert und weist zwei Unterschiede auf. Der erste Unterschied ist die Lage des Ursprungs, welcher nun möglichst im Zentrum der aktiven Leuchtfläche innerhalb des Scheinwerfers liegt. Zweitens betrachtet das Fahrzeugfeste KS kein Huben, welches in dynamischen Fahrsituationen jedoch oft auftritt.

Beide Komponenten entsprechen weitestgehend reinen Translationen ausgehend vom Fahrzeugfesten KS. Aufgrund der Steifigkeit der Karosserie können Rotationen vernachlässigt werden.

Reifenkoordinatensystem Das Reifenkoordinatensystem entspricht dem horizontalen KS bei einem Ursprung in der Mitte eines der Räder. Dabei fällt dieser Punkt bei einer senkrechten Projektion auf die geometrische Mitte der Aufstandsfläche auf der Fahrbahn. Somit kann das Reifenkoordinatensystem jeweils für alle vier Räder definiert werden. Aufgrund der dynamischen Aufhängung moderner Fahrzeuge entsprechen die x-y-Ebenen nicht zwangsläufig der gleichen Ebene, wodurch eine einzelne Beschreibung für die Erfassung der gesamten Fahrdynamik erforderlich ist.

Radachsensystem Das Radachsensystem ist wie das Reifenkoordinatensystem eine Abwandlung des horizontalen KS, bei welcher der Ursprung auf die Mitte einer der beiden Radachsen gelegt wird. Es spielt eine wichtige Rolle bei der Berechnung von fahrdynamischen Größen, da es sowohl im Einspur- als auch Zweispurmodell anwendbar ist. Für Fahrdynamikregelungen, wie beispielsweise das ESP, bildet es dadurch eine zentrale Grundlage für die mathematischen Berechnungen.

2.2.4. Fahrdynamikerfassung

Die Fahrdynamik wird durch verschiedene Sensoren erfasst und in ein für das interne Fahrzeugmodell angepasstes Signal umgewandelt, welches für die Projektionsstabilisierung verwendet wird. Die wichtigste Komponente ist dabei die Erfassung der Fahrzeugeigenbewegung, welche vor allem unter dem Begriff Egomotion bekannt ist. Über die Kopplung des Scheinwerfers mit der Fahrzeugkarosserie beschreibt diese direkt die Bewegung des Projektors im Raum und die relative Bewegung zum Projektionsort.

Im Fahrzeug stehen für die direkte und indirekte Erfassung dieser Bewegung verschiedene Sensoren zur Verfügung, welche hier diskutiert werden.

Inertialsensor

Ein Großteil der sensorischen Aufgabe der Bewegungserfassung wird durch die inertielle Messeinheit, bestehend aus einem Beschleunigungs- und einem Drehratensensor, übernommen [Y. Zhang u. a., 2009]. Diese Sensoren sind im Fahrzeug für verschiedene Funktionen wie das ESP verbaut und können die Drehraten und Beschleunigungen in allen 3 Koordinatenachsen in einem großen und einstellbaren Frequenzbereich messen. Leider sind der Fahrzeugnick- und wankwinkel keine Größen im inertialen Messsystem des Weltkoordinatensystems, weshalb sie nicht direkt durch den Drehratensensor erfasst werden.

Da jedoch die Fahrzeugdrehungen durch Fahrbahnkrümmungen, aufgrund der Bauvorschriften von Straßenanlagen [Dipl.-Ing. G. Hartkopf, 2012], nur relativ niederfrequente Komponenten in den Messungen enthalten, können die für die Stabilisierung besonders zeitkritischen Bewegungen relativ zur Straße durch eine angepasste Frequenzfilterung der Signale erhalten werden. So sind alle Fahrbahnprofile als Klothoiden ausgelegt und führen hierdurch nur zu sich stetig ändernden Drehraten. Auch die Mindeststrahlen und die allgemeinen Klothoidenparameter sind abhängig von der Entwurfsgeschwindigkeit der Fahrbahn, so dass die gewählten Grenzfrequenzen der Filterung an die vom Fahrzeug erkannten Geschwindigkeitsbeschränkungen

und die aktuelle Fahrtgeschwindigkeit angepasst werden können. Die genauen Verhältnisse im Fahrbetrieb werden in Kapitel 6 diskutiert.

Gemessene Anregungen im Fahrzeug, die außerhalb dieses dynamischen Bereichs liegen, sind dementsprechend eine Folge von Beschleunigungsvorgängen oder Unregelmäßigkeiten der Fahrbahn und können für die Bestimmung der Fahrzeugdynamik im Horizontierten KS verwendet werden. Die Drehratensensorwerte liefern dann die entsprechenden Drehbewegungen im Horizontierten KS und die Beschleunigungen geben Auskunft über auf die Fahrzeugkarosserie wirkende Kräfte.

Da die Stabilisierung dieser hochfrequenten Bewegungskomponenten aber besonders anfällig für eine Latenz des Signals ist, wird die Verwendbarkeit des bereits im Fahrzeug verbauten Inertialsensors (ESP, Airbag) in Kapitel 3 genauer evaluiert und in Kapitel 5 eine Prädiktion eingeführt.

Achssensoren

Achssensoren, auch bezeichnet als Niveausensoren, sind spezielle mechanische Komponenten, welche die Höhendistanz des Fahrwerks zum Fahrzeugkörper messen können. Für diesen Zweck werden die Federwege an den Achsen oder einzelnen Rädern vermessen und diese Messwerte als ein elektrischer Signalwert weitergegeben. Der Sensor besteht dabei aus einer mechanischen Komponente, welche die Distanzänderungen weiterleitet und in eine Drehbewegung umsetzt, sowie einer elektronischen Auswerteeinheit, welche die Rotationsbewegung auswertet. Dazu wird ein metallischer Rotor im elektromagnetischen Feld verdreht, wodurch eine Feldänderung induziert wird. Die integrierte Recheneinheit kann anschließend aus diesen Änderungen auf eine entsprechende Winkeländerung schließen, welche wiederum über die bekannte Geometrie des Fahrwerks in eine entsprechende Höhenänderung übersetzt wird. Durch diese Informationen lässt sich anschließend der tatsächliche Nick- und Wankwinkel der Fahrzeugkarosserie gegenüber dem Fahrwerk direkt berechnen.

Die Informationen werden hauptsächlich von zwei Anwendungen im Fahrzeug benötigt. Zum einen ist das die bereits vorgestellte Leuchtweitenregulierung, welche die Höheninformationen benutzt, um die Schrittmotoren im

2. Grundlagen

Scheinwerfer anzusteuern. Und zweitens fahrdynamische Anpassungen des Fahrwerks, um das Fahrverhalten oder den Komfort zu erhöhen, beispielsweise indem das gemessene Fahrzeugwanken während einer Kurvenfahrt durch ein aktives Fahrwerk kompensiert wird.

Durch die Ausgabe der tatsächlichen Aufbaubewegung des Fahrzeugs an den Außenbereichen der Achsen und der Steifigkeit der Karosserie liefern uns die Achssensoren damit auch die Möglichkeit, die ungefähre Höhe der Scheinwerfer von der Fahrbahn zu bestimmen, welche eine weitere wichtige Information für die Symbolanpassung darstellt. Leider sind die Werte der Achssensoren mit einer relativ großen Latenz behaftet und niederfrequent, können also auf sich gestellt nicht für eine hochdynamische Stabilisierung verwendet werden. Außerdem stellen die Sensoren zusätzliche mechanische Komponenten dar, die einen vergleichsweise hohen zusätzlichen Materialeinsatz erfordern und dadurch ein Zusatzgewicht darstellen. Sie bedeuten damit hohe Zusatzkosten, die durch die notwendige Verkabelung und die benötigten Kontaktierungen noch weiter erhöht werden.

Aus diesen Gründen geht die Entwicklung in den Fahrzeugen in die Richtung, Achssensoren in den relevanten Anwendungen durch bereits existierende Sensoren oder kostengünstigere Alternativen zu ersetzen. So werden sie vor allem durch Beschleunigungssensoren auf MEMS-Basis ersetzt [Yargeldi, 2019], welche eine kostengünstigere Lösung darstellen, die in vielen Fällen bereits im Fahrzeug integriert ist. Diese Prozesse lassen bereits erwarten, dass Achssensoren in der Zukunft komplett substituiert und auch in höherpreisigen Modellen ersetzt werden. Um das System zur Projektionsstabilisierung möglichst breit anwendbar zu halten, wird deshalb auf die Achssensoren als Informationsquelle für die Projektionsstabilisierung verzichtet.

Raddrehzahl- und Lenkwinkelsensor

Weitere Sensoren zur Erfassung fahrdynamisch relevanter Größen stellen die Raddrehzahl- und Lenkwinkelsensoren dar. Diese sind in der Lage, Informationen über die aktuelle Fahrsituation bereitzustellen, welche für die Modellierung des Fahrzustands notwendig sind. Die Raddrehzahlsensoren liefern dabei die Drehgeschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeugräder

und sind wie die Achssensoren als integriertes Bauteil mit mechanischen und elektronischen Komponenten ausgelegt. Durch den mit der Radachse verbundenen magnetischen Drehencoder wird im Schaltkreis eine Wechselspannung induziert, deren Frequenz proportional zur Raddrehzahl ist. Durch eine anschließende Analog-Digital-Umsetzung des Signals kann damit die Raddrehzahl aller vier Räder des Fahrzeugs bereitgestellt werden.

Der Lenkwinkelsensor sitzt direkt an der Lenksäule des Fahrzeugs und misst den vom Fahrzeugführer angesteuerten Lenkwinkel. Dazu werden Messzahnräder mit eingebetteten Magneten verwendet, deren Winkelpositionen durch die Widerstandsänderung von Giant-Magnetoresistance (GMR)-Elementen erfasst werden. Durch den Einsatz mehrerer Zahnräder mit unterschiedlicher Zahnanzahl erhält man unterschiedliche Drehwinkel bei derselben Lenkradbewegung, wodurch auch in einem Winkelbereich von über 360° gemessen werden kann. Über eine Umrechnung können die einzelnen Winkelpositionen somit in einen resultierenden Lenkwinkel umgesetzt werden.

Kamera

Um die Erfassung der Fahrzeugdynamik robuster zu gestalten, kann die Redundanz der Nickwinkelbestimmung durch eine zusätzliche Nickwinkelberechnung durch die Fahrerassistenzkamera erhöht werden, welche durch die Homographie zwischen aufeinanderfolgenden Kamerabildern bereits die eigenen Nickbewegungen und damit die des Fahrzeugs rekonstruieren kann.

Durch eine Analyse der von der Kamera aufgezeichneten Bilder können ortsfeste Merkmalspunkte in den einzelnen Ausschnitten getrackt werden. Auf Basis dieser Punkte kann eine Homographie zwischen aufeinanderfolgenden Aufnahmen als Abbildungsbeschreibung berechnet werden. Hierdurch lassen sich die Bewegungen der Kamera zwischen den Aufnahmezeitpunkten - und somit auch des Fahrzeugkörpers, mit welchem die Kamera starr verbunden ist - rekonstruieren.

In Verbindung mit weiteren Informationen durch andere Sensoren, wie dem Beschleunigungssensor und den Fahrzeuggeschwindigkeiten aus der

2. Grundlagen

Odometrie, lässt sich nun durch ein Fahrwerksmodell des Fahrzeugs ein dynamischer Nickwinkelverlauf berechnen.

Diese Werte finden aktuell intern Verwendung für die Stabilisierung der Horizontposition im aktuellen Kamerabild, sind jedoch auch für die Stabilisierungsaufgabe äußerst wertvoll als Quelle für Informationen über die Fahrzeugbewegungen.

2.3. Umgebungsrekonstruktion

Als Voraussetzung für die Stabilisierung der Lichtprojektionen des Scheinwerfers muss das Umfeld des Fahrzeugs dreidimensional erfasst werden.

Die erste wichtige Komponente ist hierbei die Erfassung der Fahrbahn, auf welcher die Symbole und das allgemeine Lichtbild der Scheinwerfer projiziert werden. Sind der Verlauf und die Struktur in einem Bezugssystem zum Fahrzeug bekannt, so kann die Projektion dementsprechend angepasst werden. Zur Erfassung der Fahrbahn sind dabei Systeme basierend auf verschiedenen technischen Lösungen vorstellbar, die jedoch nicht alle für einen Einsatz im realen Fahrzeug geeignet sind.

Im Folgenden sollen verschieden Verfahren der kontaktlosen 3D-Erfassung vorgestellt und in kurzer Form erläutert werden.

2.3.1. Hochgenaue Kartendaten

Die Hochgenauen Kartendaten - auch HD-Karten genannt - bieten genaueste Informationen über die befahrene Strecke. Enthalten sind sowohl Informationen über die Topografie, wie Krümmung, Neigung, Verlauf, Höhe über dem Meeresspiegel, als auch über die Struktur und Umgebung, wie Textur und Oberflächenbeschaffenheit, sowie Signaleinrichtungen. Es existieren verschiedene Dateiformate für die Weiterverarbeitung dieser Informationen. Zwei in der Simulation und Evaluation weit verbreitete Standards sind beispielsweise das OpenDRIVE [ASAM, 2023b] und OpenCRG [ASAM, 2023a] der Association for Standardization of Automation and Measuring

Systems (ASAM). OpenDrive stellt dabei eine Beschreibung des Straßennetzwerks mit einzelnen Spuren, Referenzlinien, dem Höhenprofil und Features wie Signaleinrichtungen und Verkehrsschildern dar. OpenCRG bietet aufbauend auf OpenDRIVE eine genaue Beschreibung der Fahrbahnstruktur, indem die Oberfläche durch ein gleichmäßiges Gitter beschrieben wird. Je nach gewünschter Genauigkeit und Auflösung sind so millimetergenaue Beschreibungen möglich.

Es existiert keine feste Definition, ab welchem Detailgrad von hochgenauen Kartendaten gesprochen werden kann. Meist ist die Angabe gekoppelt mit der Genauigkeit des verwendeten Positionsbestimmungssystems. Klassische satellitenbasierte Systeme wie das GPS erreichen Genauigkeiten im einstelligen Meterbereich, sodass meist ab einer Genauigkeit im Dezimeterbereich von hochgenauen Karten gesprochen wird. Gekoppelt mit der begrenzten Genauigkeit von state-of-the-art Positionsbestimmungssystemen wie das differentielle GPS, welche sich ebenfalls im Zentimeter- bis Dezimeterbereich befinden, ist keine exakte Beschreibung der Fahrbahnunebenheiten vor dem Fahrzeug möglich. Aus diesem Grund können die HD-Karten im aktuellen technischen Stand nur für eine grobe Profilanpassung der Projektion verwendet werden und ermöglichen keine Anpassung an feine Strukturen im Zentimeterbereich.

Die HD-Karten wurden im Einsatzzweck vor allem für das autonome Fahren konzipiert, um das Fahrzeug mit genauen Informationen über seine Umgebung zu versorgen und im Voraus Fahrmanöver wie Spurwechsel und Stopps oder Aufforderungen an den Fahrzeugführer, beispielsweise bei aufkommenden Baustellendurchfahrten, planen zu können. Die Qualität des Höhenprofils der Fahrbahn ist für die Verwendung zur Projektionsanpassung deshalb nicht ausreichend und aktuell nur in einem sehr geringen Anteil des Straßennetzes verfügbar. Aus diesem Grund werden Karteninformationen als Quelle für die Projektionsstabilisierung nicht weiter betrachtet.

2.3.2. Radar

Radarsensoren gehören mittlerweile zur Standardausstattung bei fast allen Fahrzeugen durch die verbreitete Umsetzung der vorgeschriebenen City-Notbremsfunktion. Sie können die Entfernung des Zielpunkts und seine relative Geschwindigkeit zum Sensor messen.

Aktuelle Radarsysteme sind aufgrund ihrer geringen Winkelauflösung jedoch nicht in der Lage, Entfernungsinformation für die gesamte Fahrbahnfläche bereitzustellen. Dadurch ist der Einsatz für eine Fahrbahnerfassung nicht möglich.

2.3.3. LiDAR

Im Vergleich mit dem Radar sind LiDAR-Sensoren in der Lage, Entfernungsaufnahmen der Umgebung in hoher Auflösung zu erzeugen. Jedoch sind die für die Fahrerassistenzfunktionen eingesetzten LiDAR-Sensoren nicht auf eine Erfassung der Fahrbahn ausgelegt. Für eine Erfassung müsste deshalb ein separates Boden-LiDAR entwickelt und verbaut werden, was einen hohen zusätzlichen Kostenfaktor mit sich bringt.

Aus diesem Grund wird die Fahrbahnerfassung per LiDAR nicht weiter betrachtet.

2.3.4. Indirektes Time-of-Flight

Time-of-Flight (ToF) ist ein Messprinzip, welches zur Bestimmung von Entfernungen verwendet wird. Es basiert auf dem Grundprinzip der Triangulation, wobei die Zeit gemessen wird, die ein Lichtimpuls vom Aussenden über die Reflektion an einem Objekt bis zum Zurückkehren benötigt. Aus dieser Zeit und der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit im jeweiligen Medium kann so die zurückgelegte Distanz sehr einfach bestimmt werden. Durch die hohe Geschwindigkeit des Lichts sind, zum Beispiel im Vergleich zu Ultraschallsensoren mit ähnlichem Messprinzip, sehr niedrige Latenzen

bei der Messung erreichbar. So beträgt die Laufzeit des Lichtsignals bei einem Objekt in 15 m Entfernung nur 0,1 ns.

Diese hohe Geschwindigkeit macht jedoch eine vergleichsweise komplexe Steuer- und Auswerteeinheit notwendig, weshalb Anwendungen in der Vergangenheit oft auf Bereiche in der Robotik und Automatisierung begrenzt waren, wo Größe und Preis weniger wichtige Kriterien darstellen.

Indirekte ToF-Kameras (iToF) stellen eine Weiterentwicklung dieser einkanaligen Sensoraufbauten dar, bei der der Lichtimpuls durch einen VCSEL (engl. Abk. für vertical-cavity surface-emitting laser)-Laser ausgesendet und nach der Reflexion durch einen angepassten CMOS-Sensor ausgewertet wird. Hierdurch lassen sich inzwischen hohe Auflösungen bis hin zu VGA erreichen. Für die Auswertung der Signale wird ein moduliertes Signal ausgesendet und ein phasenverschobenes Signal, abhängig von der Entfernung des Signals, wieder empfangen. Im Automobilbereich werden diese bereits seit einigen Jahren verwendet, insbesondere in der Innenraumüberwachung, um Fahrer und Passagiere zu erkennen und deren Haltung und Gesten auszuwerten.

Nachteile von ToF-Kameras sind die hohe Störanfälligkeit gegenüber Tageslicht, welche die erreichbare Genauigkeit stark verringert und sogar dazu führen kann, dass einzelne Bereiche des Bilds zeitweilig nicht mehr auswertbar sind. Ein weiterer Nachteil ist die Eindeutigkeit des Messbereichs, welche aufgrund des Messprinzips stark eingeschränkt ist. So tritt dieselbe Phasenverschiebung alle $\frac{c}{2 \cdot f_{\text{mod}}}$ Meter auf. Hierdurch kommt es, je nach genauer Auslegung des verwendeten Systems, zu einer Uneindeutigkeit der Entfernung, die einem Vielfachen n des Messbereichs entspricht. Aus diesem Grund sind aktuell erhältliche Sensoren in ihrer maximalen Messentfernung auf Bereiche um die 10 m beschränkt. Es sind jedoch bereits Prototypen in Entwicklung, welche Entfernungen bis hin zu 100 Metern erreichen.

Da das Stabilisierungsproblem nur bei Dunkelheit relevant ist und der Projektionsbereich der Scheinwerfer für Symbolprojektionen eingeschränkt ist, sind diese Punkte jedoch kein KO-Kriterium für das entwickelte System. Der wichtigste Faktor, welcher gegen einen Einsatz spricht, ist die Notwendigkeit des Einbaus eines neuen Sensors, der keinen sonstigen Verwendungs-

2. Grundlagen

zweck aufweist und in der benötigten Messgenauigkeit standardmäßig nicht erhältlich ist. Es sind speziell angepasste Systeme mit hohen Kosten notwendig, welche dadurch noch nicht wirtschaftlich einsatzfähig sind.

2.3.5. Kamerabasierte Rekonstruktion

Die im Fahrzeug verbaute Kamera hat im Vergleich zu den zuvor genannten Sensoren eine äußerst gute Winkelauflösung und Punktdichte in ihrem Erfassungsbereich, welcher den gesamten relevanten Fahrbahnbereich vor dem Fahrzeug erfasst. Hierdurch ist es möglich, Entfernungsinformationen über die Fahrbahn in relativ großer Entfernung zu erhalten.

Durch diese Eigenschaften sind Kamerabilder sehr gut geeignet, um viele Informationen über die Fahrbahn vor dem Fahrzeug innerhalb eines kurzen Zeitfensters zu erhalten. Im nächsten Schritt ist eine passende und zuverlässige Auswertung dieser Aufnahmen notwendig, um eine Tiefeninformation über die Fahrbahn zu erhalten und das Ergebnis für die Projektionsanpassung verwenden zu können. Es existiert eine Vielzahl an verschiedenen Verfahren, welche auf der Auswertung von zweidimensionalen Kameraabbildungen der Szene basieren. Obwohl durch die Projektion der dreidimensionalen Szene auf den 2D-Sensor eine Dimension verloren geht, können durch Informationen über die Eigenschaften der Projektion und zusätzliche Informationen aus weiteren Quellen die Tiefeninformationen der Szene und somit die 3D-Punkte rekonstruiert werden.

Shape-from-X

Als Shape-from-X wird eine Familie verschiedener Verfahren bezeichnet, welche es ermöglichen, unter Ausnutzung verschiedener Parameter Tiefeninformationen aus Kamerabildern zu extrahieren. Die wichtigsten Vertreter werden nun aufgelistet. Shape-from-Shading (SfS) ermöglicht die Tiefenrekonstruktion, indem die Reflexionseigenschaften von Objekten in Bildern ausgewertet werden. Dabei wird eine künstliche Beleuchtung erzeugt, um aus den Reflexionen und dem Schattenwurf 3D-Informationen über die Objekte zurückzurechnen. Shape-from-Motion (SfM) hingegen nutzt die

relative Bewegung zur Kamera einzelner Objekte in aufeinanderfolgenden Bildern, um daraus Aussagen über die 3D-Form des Objekts treffen zu können. Neben diesen zwei Techniken existieren auch weitere Ansätze wie Shape-from-Texture (SfT), Shape-from-Shadows (SfSh) oder Shape-from-Contour (SfC). Shape-from-X-Verfahren benötigen entweder wohldefinierte Randbedingungen (bspw. SfS), benötigen lange Aufnahmereihen (SfM) oder bieten geringe Genauigkeiten.

Stereo-Matching

Das Stereo-Matching basiert auf den mathematischen Grundlagen der Mehr-Ansichten-Geometrie, wie sie in Abschnitt 2.4.6 vorgestellt werden. Dazu werden meist zwei Kameras verwendet, welche Bilder derselben Szene aus unterschiedlichen Positionen und evtl. unterschiedlichen Orientierungen heraus aufnehmen. Anschließend werden verschiedene Merkmalspunkte aus Bildern der Kameras, die zum selben Zeitpunkt aufgenommen wurden extrahiert. Aus diesen werden Korrespondenzpaare zwischen jeweils einem Punkt der beiden Kameras gebildet, welche dem gleichen Punkt in der dreidimensionalen Umgebung entsprechen. Die Korrespondenzfindung kann dabei auf verschiedenen Eigenschaften wie Kanten [Gioi u. a., 2010], Texturen und Farben basieren. Dieses Stereo-Matching erlaubt die Berechnung der Verschiebung in der Pixelposition zwischen den beiden Kameras und damit über die bekannten intrinsischen und extrinsischen Eigenschaften der Kameras die Berechnung der dreidimensionalen Position des Punktes im Raum.

Es existieren bereits verschiedene Teilsysteme im Fahrzeug, die eine Tiefenrekonstruktion über ein Stereo-Matching verwenden, von denen zwei fahrbahnbezogene vorgestellt werden sollen.

Road Profile Das bei Mercedes-Benz Road Profile (RP) getaufte System ermöglicht es, durch Kamerabilder von der Fahrbahn vor dem Fahrzeug, ein Profil der Straße zu erstellen.

Die Berechnung erfolgt auf Basis der Annahme von parallelen Fahrspuren. Im Kamerabild werden die Fahrspurlinien detektiert und ausgewertet. Falls

2. Grundlagen

diese Linien nicht direkt im Fluchtpunkt der Kameraabbildung zusammenkommen, so wird diese Verschiebung durch Änderungen der Fahrbahn in ihren Krümmungen und dem Höhenverlauf verursacht.

Durch die Stärke und Art der Verschiebung wird so ein Straßenprofil als Doppelklothoide erstellt, mit Winkel- und Höhenangaben der Straßenoberfläche im Bezug zum Fahrzeugkoordinatensystem. Dabei nimmt die Dichte der Informationspunkte mit Entfernung zum Fahrzeug aufgrund des festen Winkelbereichs der Kameraabbildung fortlaufend ab.

Das Straßenprofil kann so lange ausgegeben werden, wie Fahrspuren durch die Kamera erkannt werden können. Bei Dunkelheit ist hierfür die Beleuchtung durch die Scheinwerfer ausreichend. Die geforderte Reichweite des Systems übersteigt mit ≈ 50 m (ab Fahrzeugfront) den Leuchtbereich der Scheinwerfer für die Symbolprojektionen deutlich, welcher für eine gute Darstellung bei 18m begrenzt ist.

Hierdurch kann das System während der Fahrt bereits im Vorfeld Informationen für eine Anpassung der Projektion im relevanten Leuchtbereich bereitstellen. Jedoch ist das RP stark in den Informationseigenschaften eingeschränkt. So stehen Messpunkte nur in einem Abstand von jeweils einem Meter zur Verfügung, wobei die Genauigkeit mit zunehmender Entfernung stark abnimmt. In 5 Metern Entfernung von der Fahrzeugfront beträgt die Höhengenaugkeit noch 5 cm und in 15 Metern Entfernung beträgt dieser Wert bereits 10 cm.

Road Surface Scan Der Road Surface Scan (RSS) kann als eine Art Spezialisierung des Road Profile angesehen werden. Er liefert für einen reduzierten Entfernungsbereich hochgenaue Höheninformationen der Straßenoberfläche vor dem Fahrzeug im Fahrzeugkoordinatensystem. So liegt der maximale Höhenfehler bei 20 Metern Entfernung bei 3,5 cm, bei 10 Metern Entfernung kann bereits eine Höhengenaugkeit von 2 cm erreicht werden [Cytrynski, 2013]. Diese Werte werden mithilfe eines Stereo-Matchings, basierend auf einem vorkalibrierten Verbund aus Windschutzscheibe und Stereokamera, erreicht.

In der aktuellen Fassung werden die Höheninformationen ausschließlich jeweils für die linke und rechte Fahrspur des Fahrzeugs ausgegeben und

dafür verwendet, dem adaptiven Luftfahrwerk Informationen über Straßenebenenheiten zu liefern. Abhängig von der Ausprägung der Unebenheit versucht das System das Fahrwerk so anzupassen, dass bei einer Überfahrt möglichst wenig Fahrzeugbewegungen induziert werden.

Es ist zu beachten, dass Straßen im Allgemeinen nur sehr gering texturierte Flächen sind, weshalb eine Extraktion dieser Informationen aus den reinen Bildern nur bedingt und in geringer Qualität möglich ist. Aus diesem Grund weist sowohl das RSS als auch das RP bei Dunkelheit, welche die Grundbedingung für Projektionen darstellt, eine starke Degradation der Signalgenauigkeit bis hin zur Unbrauchbarkeit auf. Außerdem benötigen beide Systeme aufgrund der Verwendung des Stereo-Matchings eine Stereokamera. Variationen auf Basis von Monokamera-Systemen unter Verwendung von Shape-from-X weisen eine geringere Performance auf.

Um die Genauigkeit und gebotene Auflösung des RSS für die Vermessung der Symbolprojektionsfläche auch in der Dunkelheit zu ermöglichen, sind daher zusätzliche Informationen in der Szene notwendig. Um eine zusätzliche Informationsquelle für diese durch die Kamera beobachtete Oberflächenstruktur zu erhalten, kann die hohe Auflösung der Scheinwerfer ausgenutzt werden, um zusätzliche Informationen in die Szene zu kodieren. Diese Systeme werden wegen der aktiven Projektionskomponente als aktive Triangulation bezeichnet und basieren wie das Stereo-Matching auf dem Grundprinzip der Triangulation. Projiziert das System eine hochauflösende, flächige Lichtverteilung für die Rekonstruktion, wie es im Fahrzeugscheinwerfer der Fall ist, so wird das Verfahren als strukturiertes Licht (SL) bezeichnet. Die Begriffe aktive Triangulation und strukturiertes Licht werden in der Literatur jedoch auch oft synonym und austauschbar verwendet. In Kapitel 4 wird das System vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert.

2.4. Kamerasysteme

In modernen Fahrzeugen, vor allem höherer Preisklassen, sind viele verschiedene Kameras für die Umgebungserfassung verbaut. Sie helfen dem Fahrzeugführer bei der Orientierung, beispielsweise als Rückfahr-, Boden- und 360-Grad-Kamera, oder werden aktiv von anderen Komponenten und

2. Grundlagen

Funktionen des Fahrzeugs als Sensorsystem zur Umgebungswahrnehmung verwendet. Für die Realisierung vieler intelligenter Lichtfunktionen ist die Fahrerassistenzkamera von großer Bedeutung. Diese stellt die zentrale Kameraeinheit im Fahrzeug dar und ist für die Überwachung und Erfassung der Verkehrssituation vor dem Fahrzeug verantwortlich. Um die relevanten Bereiche zu erfassen, ist sie hierfür im zentralen, oberen Rand der Windschutzscheibe positioniert. Durch eine Weiterverarbeitung der Bilder können verschiedenste Informationen über die Fahrzeugumgebung extrahiert werden. Beim Licht werden auf Basis der Erkennung von anderen Verkehrsteilnehmern und Fahrbahnbegrenzungen und -verläufen beispielsweise die Funktionen des Fernlichtassistenten und des Kurvenlichts umgesetzt. Weiterhin ist die Fahrerassistenzkamera als Haupt- oder Ergänzungssensor Bestandteil einer Vielzahl von Fahrerassistenzfunktionen im Fahrzeug. Wie in Abschnitt 2.3.5 aufgezeigt wurde, kann die Kamera ebenfalls als Grundlage zur Fahrdynamikerfassung und Umgebungsrekonstruktion dienen. In High-End-Fahrzeugsystemen werden sehr oft Kamerapaare verbaut, um Stereokamerafunktionen wie das Stereo-Matching zu ermöglichen. In der Zukunft ist es aus Ressourcengründen jedoch das klare Ziel, alle Funktionen allein durch eine Monokamera zu gewährleisten. Aus diesem Grund sollen alle in der Arbeit erstellten Lösungen für den Monokamera-Einsatz geeignet sein.

Diese Kamera soll für das Stabilisierungssystem als Basis für die Fahrbahnerfassung und das im späteren Kapitel 4 vorgestellte System der aktiven Triangulation dienen. In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Bilderfassung über Kameras vorgestellt.

2.4.1. Aufbau

Kameras bestehen vereinfacht aus zwei Komponenten, einer Optik und einem Aufnahmemedium. Sie sind in der Lage, das in die Optik einfallende Licht in ein analoges Bild auf einem Film oder ein digitales Bild auf einem Sensor mit nachfolgendem Übertrag auf ein Speichermedium umzuwandeln. Inzwischen sind so gut wie alle Kameras digital, mit elektronischen Sensoren als bilderzeugendes Element.

Durch eine Linsenoptik werden die Lichtstrahlen, die von der Umgebung einfallen, gebündelt und auf den lichtempfindlichen Imagerchip geleitet. Dieser wandelt das Licht unter Ausnutzung des inneren Photoeffekts in digitale Signale um, wobei aufgrund der zweidimensionalen Struktur des Sensors ein uns bekanntes Bild entsteht.

2.4.2. Sensorik

Um letztendlich ein verwertbares Bild der Umgebung vor der Kamera zu erhalten, muss das durch die Optik der Kamera auf den Imager weitergeleitete und durch den Sensor erfasste Licht ausgewertet und in ein zweidimensionales Bild übersetzt werden. Hierbei entsteht auf dem Sensorarray eine Auswertung der Farb- und Helligkeitswerte für jeweils einen räumlich abgegrenzten Bereich, welcher als Pixel bezeichnet wird. Diese Bildsensoren existieren dabei in zwei verschiedenen technischen Ausführungen, die sich in Hinsicht auf ihr Verfahren für diese Auswertung unterscheiden. Sie werden als CCD (Charge Coupled Device) und CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) Chips bezeichnet.

Beide dominanten Sensortechnologien basieren auf dem photoelektrischen Effekt zur Bilderzeugung. Das einfallende Licht als elektromagnetische Welle erzeugt elektrische Ladungen auf der Sensorfläche, welche wiederum in kleine abgegrenzte Bereiche unterteilt ist. Je nach der Stärke des Lichteinfalls auf diesen Bereich werden größere oder kleinere Ladungsmengen erzeugt, welche die Helligkeit der entsprechenden Pixelbeschreibung bilden.

Die spektrale Empfindlichkeit von CCD- und CMOS-Sensoren befindet sich üblicherweise im Bereich zwischen 350 und 1050 nm. Dadurch werden auch für Menschen nicht sichtbare langwellige Infrarotstrahlen erfasst. Eine beispielhafte Empfindlichkeitskurve im Vergleich zum menschlichen Auge ist in 2.10 dargestellt.

Um natürliche Aufnahmen zu erhalten, welche der Wahrnehmung durch das menschliche Auge entsprechen, werden die Infrarotbereiche durch einen Cut-off-Filter im Strahlengang herausgefiltert. Da jeder Pixel für alle Wellenlängen in diesem Bereich empfindlich ist, kann eine Kamera intrinsisch keine Farben wahrnehmen und voneinander unterscheiden, sondern nimmt

2. Grundlagen

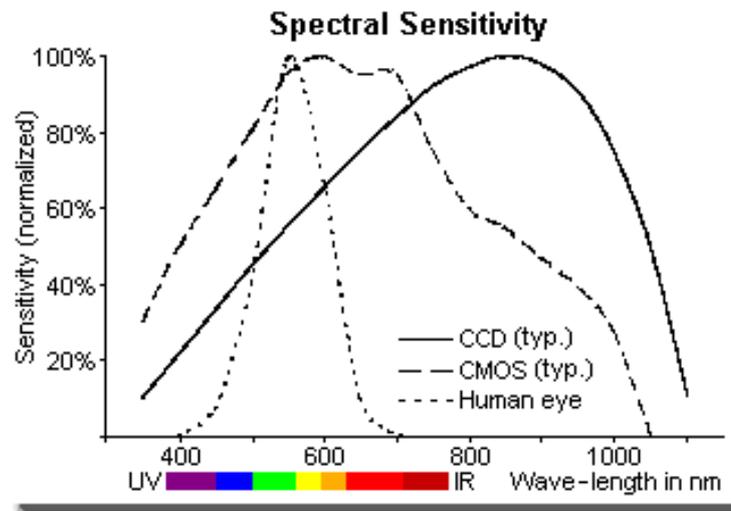


Abbildung 2.10.: Spektrale Empfindlichkeit elektronischer Sensoren [Preiss, 2023]

nur Intensitäten wahr. Um dennoch eine Farbwahrnehmung zu ermöglichen, werden die Sensoren beschichtet, um die Empfindlichkeit für verschiedene Wellenlängenbereiche zu reduzieren. Damit werden spezielle Abschnitte für den roten, grünen und blauen Farbkanal gebildet, deren aufgenommenen Intensitäten zu einem resultierenden Farbwert eines Pixels zusammengesetzt werden.

Heute werden, trotz ihrer geringeren Empfindlichkeit und somit höherem Rauschen, ausschließlich CMOS-Sensoren verwendet, da sie günstiger sind und ein schnelles Auslesen (und somit höhere Bildraten mit geringerer Verzögerung) sowie eine direkte Bildverarbeitung auf dem Chip ermöglichen. Beim CMOS-Sensor wird in jedem lichtempfindlichen Bereich die Umwandlung der Ladung in Spannung separat durchgeführt, welche auch einzeln angesteuert werden können. Hierfür sind jeweils Verstärker und Transistoren verbaut, durch welche die Pixel einzeln aktiviert, ausgewählt und verstärkt werden können.

Durch den direkten Zugriff auf die einzelnen Bereiche bieten CMOS-Sensoren eine höhere Geschwindigkeit beim Auslesen sowie eine höhere Dynamik aufgrund der Abtrennung der Bereiche voneinander. Diese ho-

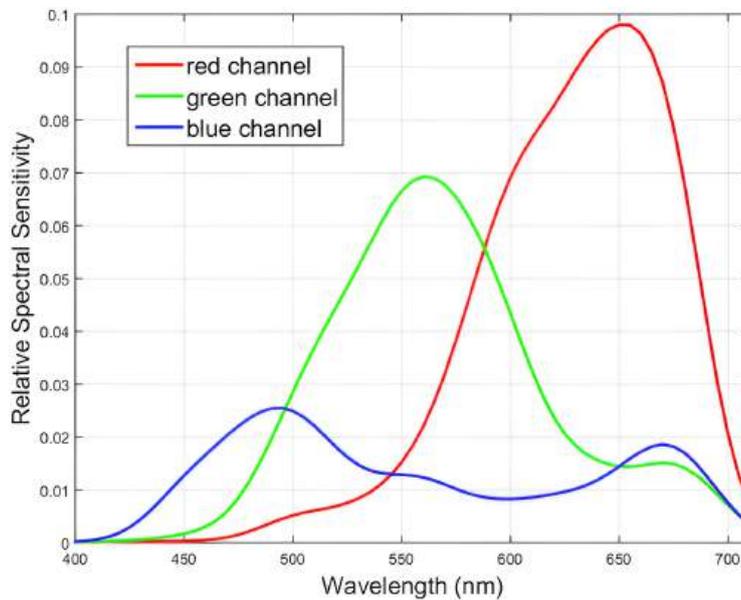


Abbildung 2.11.: Spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Farbkanäle [Deglint u. a., 2016]

Die Dynamik ist speziell für Fahrerassistenzanwendungen von besonderer Bedeutung: Sie erlaubt es, in einem breiten Bereich der Lichtintensität verwertbare Aufnahmen zu generieren. Den Problemen durch das Fixed-Pattern-Noise wird dabei durch eine linearlogarithmische Kennlinie entgegengesteuert. Da außerdem keine Ladungen über große Strecken bewegt werden müssen, ist eine geringere Signalverstärkung notwendig, was einen geringeren Energieverbrauch zur Folge hat. Im Gegensatz zu CCD ist die allgemeine Empfindlichkeit jedoch geringer, und der Sensor weist erhöhtes Rauschen sowie eine geringere Uniformität auf, verursacht durch unterschiedliches Verhalten der einzelnen Signalwandler.

Eine Gegenüberstellung der Eigenschaften beider Sensoren ist in Tabelle 2.1 gegeben.

2. Grundlagen

Sensor	CCD	CMOS
Pixelsignal	Elektronenpaket	Spannung
Chipsignal	Analog	Digital
Füllfaktor	Hoch	Moderat
Responsivität	Moderat	Hoch
Rauschen	Niedrig	Hoch
Dynamikumfang	Hoch	Moderat
Uniformität	Hoch	Niedrig
Auflösung	Hoch	Hoch
Geschwindigkeit	Moderat	Hoch
Leistungsaufnahme	Hoch	Niedrig
Komplexität	Niedrig	Moderat
Kosten	Moderat	Niedrig

Tabelle 2.1.: Vergleich der Eigenschaften von CCD- und CMOS-Sensoren [Edmund-Optics, 2023]

2.4.3. Verschlussverfahren

Ein weiterer großer Faktor für die Eigenschaften der mit der Kamera aufgenommenen Bilder stellt das Verschlussverfahren für die Belichtung dar. Durch das Verschlussverfahren wird festgelegt, wann die einzelnen Pixel im Vergleich zu anderen Pixeln auf dem Sensor belichtet werden. So können alle Pixel zur selben Zeit ausgewertet oder einzelne Sensorbereiche zeitlich versetzt voneinander betrachtet werden. Das Global Shutter und das Rolling Shutter Verfahren sind hierbei die am weitesten verbreiteten Ausführungsformen. Beim Global Shutter wird der Bezeichnung entsprechend die gesamte Sensorfläche gleichzeitig belichtet und ausgewertet, wo im Gegensatz hierzu der Rolling Shutter die Sensorfläche zeilenweise belichtet und ausgewertet.

Durch das zeilenweise Auslesen kann es jedoch bei bewegten Szenen zu Bewegungsverzerrung durch den Rolling-Shutter-Effekt kommen. Dabei verändert sich die Szene zwischen den einzelnen Zeilenauswertungen der Szene, während das Bild erstellt wird. In Figur 2.12 ist dieser Effekt am Beispiel eines sich bewegenden Objekts dargestellt. Während der Aufnahme bewegt sich das rechteckige Objekt von links nach rechts im Kamerabild.

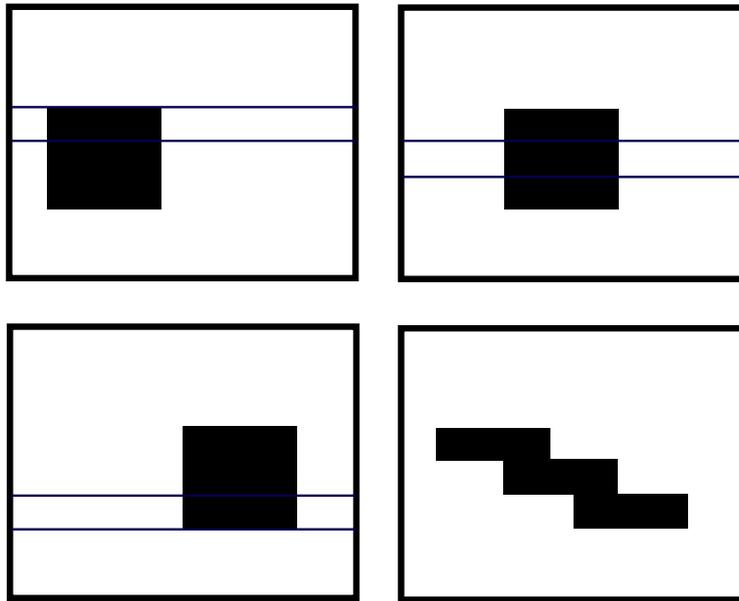


Abbildung 2.12.: Auswirkung des Rolling-Shutter-Effekts bei bewegten Objekten

Beim Auslesen der einzelnen Zeilen von unten nach oben befindet es sich aber jedes Mal in einem anderen Bereich, weshalb das resultierende Bild ein von oben nach unten zeilenweise in seine Bewegungsrichtung verzerrtes Objekt zeigt.

Aufgrund des sequenziellen Auslesens und der erfolgenden Ladungsspeicherung können bei CCD-Sensoren alle Pixel gleichzeitig beleuchtet werden, weshalb jede Kamera mit CCD-Sensor einen Global Shutter besitzt. Bei CMOS-Sensoren jedoch ist aufgrund des Aufbaus ein Global Shutter nur durch Integration zusätzlicher Auslesetransistoren in den Chipbereich möglich. Dies verursacht hohe Zusatzkosten, weshalb CMOS-Kameras, mit Ausnahme von wenigen Spezialkameras, Rolling Shutter Verschlüsse besitzen.

2.4.4. Kameraabbildung

Moderne Fahrzeuge sind mit immer mehr und immer höher auflösenderen Kameras ausgestattet, um die Umgebung zu erfassen und entweder durch die direkte Bereitstellung des Bildes (Rückfahrkamera, 360-Grad-View) oder eine maschinelle Verarbeitung (Verkehrsteilnehmererkennung) den Fahrer zu unterstützen.

Kameras können hierbei allgemein als eine mathematische Abbildung angesehen werden, welche die dreidimensionale Welt auf eine zweidimensionale Ebene abbildet. Dabei wird ein Weltpunkt X_w durch einen Punkt x_s im Bild der Kamera dargestellt. Die Position dieses Bildpunktes, beziehungsweise die Transformation, wird durch die spezifische Abbildungseigenschaft der vorliegenden Kamera definiert. Um diese Abbildung zu beschreiben, gibt es verschiedene mathematische Modelle, welche die Transformation zwischen Welt und Bild charakterisieren.

Kameramodell

Um das spezifische Kameramodell herzuleiten, wird der Aufbau der Kamera vereinfacht und als Basis verwendet. Die einfachste Beschreibung der Abbildungseigenschaften ist dabei das sog. Lochkameramodell. Dieses modelliert den Lichteinfall der betrachteten Szene durch eine Lochblende minimaler Größe, wohinter das Bild der Brennweite entsprechend punktsymmetrisch projiziert wird.

In Zeichnung 2.13 ist die Abbildungsgeometrie der Lochkamera dargestellt.

Das Kamerazentrum liegt im Ursprung des Kamerakoordinatensystems, wobei die Hauptachse der Z_c -Achse entspricht. Die Abbildung x eines Punktes X in der Welt kann über den Schnittpunkt der Geraden zwischen X und dem Kamerazentrum C mit der Bildebene aufgestellt werden. Zuvor findet im Allgemeinen noch eine Transformation von X in die Kamerakoordinaten X_c statt.

In der Literatur [Hartley und Zisserman, 2004] wird bei diesem Aufbau von einer endlich projektiven (engl. finite projective) Kamera gesprochen. Diese

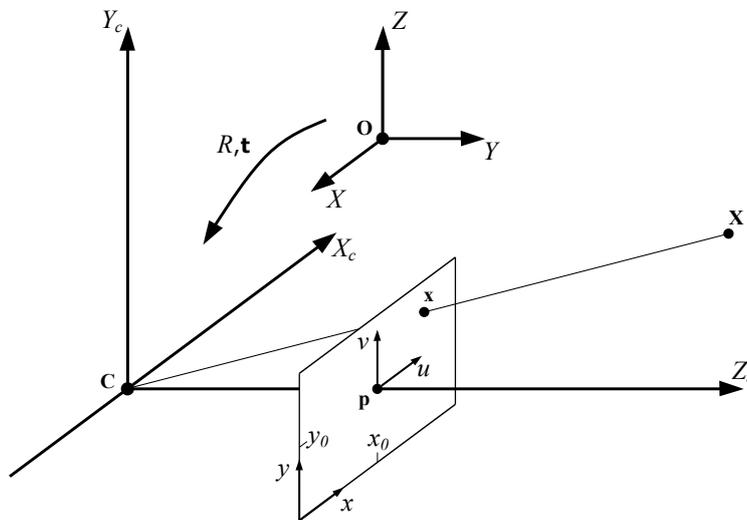


Abbildung 2.13.: Abbildungsgeometrie einer Lochkamera mit Kamerazentrum C und Hauptpunkt p . Die Verschiebung zwischen Bild- und Sensorebene ist zu erkennen, ebenso wie die Transformation von Welt- zu Kamerakoordinaten. Adaptiert nach [Hartley und Zisserman, 2004]

modelliert die Abbildung als Zentralprojektion auf eine Ebene mit einem Zusammentreffen der Lichtstrahlen im Kamerazentrum C . Die Hauptachse ausgehend vom Kamerazentrum schneidet die Bildebene dabei im Hauptpunkt p . Die endlich projektive Kamera ermöglicht damit eine kohärente und akkurate Beschreibung der Kameraeigenschaften und erhält gleichzeitig wichtige geometrische Eigenschaften wie die Perspektive. Außerdem ist die Abbildung affin, wodurch Geraden im Bild erhalten werden. Sie kann gleichzeitig aber mit wenigen Parametern beschrieben und einfach berechnet werden. Diese Parameter lassen sich dabei in extrinsische und intrinsische Komponenten aufteilen. Die extrinsischen Parameter beschreiben dabei die Beziehung zwischen Welt- und Kamerakoordinaten und sind abhängig von der Position und Orientierung der Kamera. Damit sind sie veränderlich und nicht fest. Intrinsische Parameter hingegen sind konstant, so lange interne Eigenschaften der Kamera wie Brennweite und Linsen-/Sensorposition nicht verändert werden. Sie beschreiben die reine Abbildung von Punkten im dreidimensionalen Kamerakordinatensystem in das zweidimensionale Bildkoordinatensystem.

2. Grundlagen

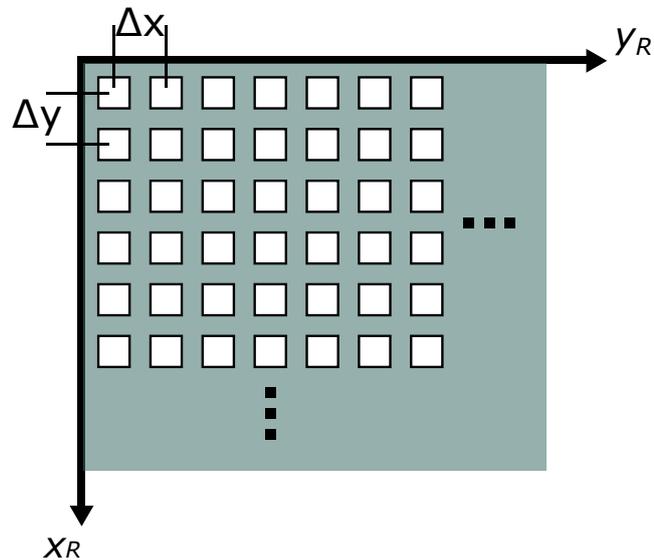


Abbildung 2.14.: Pixel in Rechnerkoordinaten

Um eine Beschreibung dieser Abbildungseigenschaften und der Kameraparameter zu erhalten, soll im Folgenden das mathematische Kameramodell hergeleitet werden. Ausgehend von Abbildung 2.13 kann unter Verwendung der Strahlensätze die Kamera-Projektionsmatrix

$$P := \begin{pmatrix} f & 0 \\ f & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} = \text{diag}(f, f, 1)[I|0] \quad (2.1)$$

aufgestellt werden, mit der Brennweite f als einzigem Parameter.

Bildkoordinaten Die aufgenommenen Bilder liegen jedoch digital nicht im Bildkoordinatensystem vor, welches ein metrisches Koordinatensystem ist. Es besitzt ein Array aus Pixeln, welches als Rechnerkoordinatensystem bezeichnet wird und auf dessen Basis die spätere Verarbeitung stattfindet. In Skizze 2.14 ist der Sachverhalt dargestellt.

Der Ursprung stimmt sehr oft nicht mit dem Hauptpunkt im Ursprung des Bildkoordinatensystems überein und kann beliebig festgesetzt werden.

Häufig wird er auf einen Eckpixel $(x_0, y_0)^T$ des Bildes festgesetzt, weshalb eine entsprechende Verschiebung eingeführt wird.

Intrinsische Parameter Digitale Sensoren besitzen in Wirklichkeit keine perfekt quadratischen Pixel. Wir definieren m_x und m_y als Pixeldichten in den x - und y -Richtungen des Sensors. Weiter wird festgelegt, dass $\alpha_x = fm_x$ und $\alpha_y = fm_y$. Damit wird die Projektionsmatrix zu

$$P = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & x_0 & 0 \\ & \alpha_y & y_0 & 0 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Die Komponente

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & x_0 \\ & \alpha_y & y_0 \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

wird hierbei als Kamera-Kalibriermatrix bezeichnet.

Der zusätzlich eingeführte Parameter s steht hierbei für den Pixelskew, der die asymmetrische Ausrichtung der beiden Bildachsen des Sensors zueinander darstellt. Er berechnet sich aus der Brennweite in Pixeln R_x und der Winkeldifferenz der Pixel x - und y -Achsen vom rechtwinkligen Fall α zu $s = R_x * \tan(\alpha)$. Durch hochgenaue Fertigungsverfahren in der Herstellung des Chips beträgt dieser Wert bei Digitalkameras jedoch nahezu Null und kann damit weggelassen werden. Die Koordinaten des Hauptpunkts sind $(x_0, y_0)^T = (m_x p_x, m_y p_y)^T$. Die Matrix K enthält somit die intrinsischen Parameter der Kamera, welche f , x_0 , y_0 , α_x , α_y und s sind.

Extrinsische Parameter Das Fahrzeug, und damit auch die verbaute Kamera, kann frei in der Welt bewegt werden. Diese Bewegungen stellen dabei Starrkörpertransformationen dar. Um diese Verschiebungen und Verdrehungen zwischen dem Welt- und Kamerakoordinatensystem zu berücksichtigen, werden weitere extrinsische Parameter eingeführt. Sei \mathbf{X} ein Punkt gegeben

2. Grundlagen

in Weltkoordinaten. Der korrespondierende Punkt \mathbf{X}_c in Kamerakoordinaten wird beschrieben durch

$$\mathbf{X}_c = \begin{pmatrix} R & -R \tilde{\mathbf{C}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{x} \quad (2.4)$$

wo $\tilde{\mathbf{C}}$ dem Kamerazentrum \mathbf{C} in Weltkoordinaten entspricht.

Die extrinsischen Parameter sind durch die Einträge der Rotationsmatrix $R \in SO(3)$ gegeben, wobei das Kamerazentrum $\tilde{\mathbf{C}}$ als Translationsvektor fungiert. Dies führt zum allgemeinen Lochkameramodell nach [Hartley und Zisserman, 2004]:

$$\mathbf{x} = KR[I | -\tilde{\mathbf{C}}]\mathbf{X} = P\mathbf{X} \text{ mit } P := KR[I | -\tilde{\mathbf{C}}] \quad (2.5)$$

Insgesamt besitzt dieses Kameramodell 11 Freiheitsgrade. Diese setzen sich zusammen aus jeweils drei für das Kamerazentrum $\tilde{\mathbf{C}}$ und die Rotation R , sowie den fünf intrinsischen Parametern aus K .

2.4.5. Verzerrungen

Das Kameramodell in der bisher vorliegenden Form wurde von der Lochkamera kommend hergeleitet und ist linear. Damit hat es ideale Eigenschaften für die Bildaufnahme und berücksichtigt keine Fehlerphänomene. Dieser Aufbau der Kamera ist jedoch nur theoretischer Natur, da durch das unendlich kleine Loch kein ausreichender Lichteinfall möglich ist. Reale Kameras besitzen deshalb größere Sensoröffnungen und arbeiten mit angepassten Linsensystemen, welche dazu verwendet werden, die Lichtstrahlen von außen zu bündeln und auf den Sensorchip zu werfen. Durch diesen Aufbau entstehen jedoch Verzerrungen im aufgenommenen Bild, verursacht durch die Lichtführungseigenschaften der Linsen. In der Literatur wird hauptsächlich zwischen drei verschiedenen Phänomenen unterschieden, der radialen, tangentialen und Dünnpisma-Verzerrung. Zur Kompensation wird das Kameramodell um eine nonlineare Abbildung von Bild- zu Bildkoordinaten erweitert. Dabei haben sich zwei Einzelmodelle zur radialen und tangentialen Verzerrung als ausreichend für die Beschreibungen in Standardanwendungen herausgestellt.

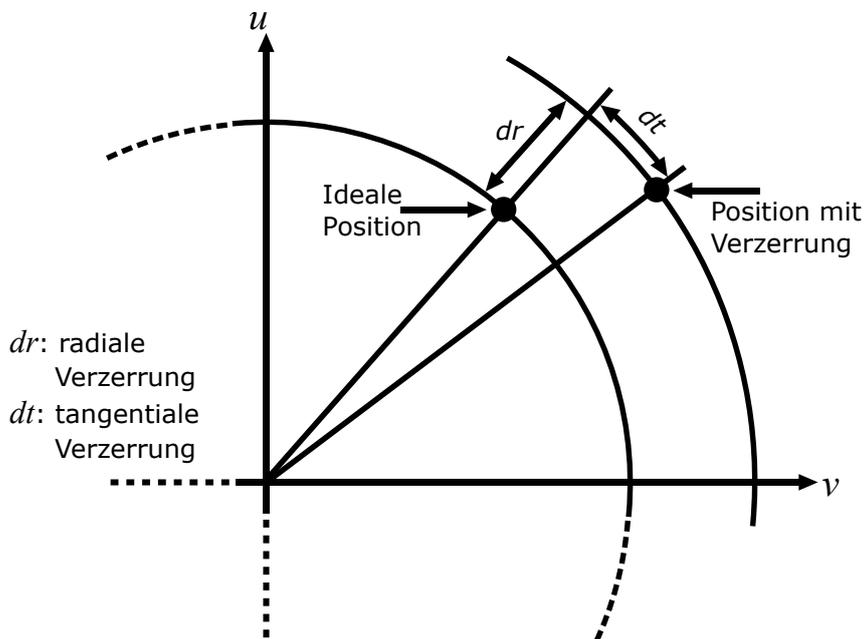


Abbildung 2.15.: Schematische Darstellung der radialen und tangentialen Verzerrung

Durch die Verzerrung werden die idealen (und nicht messbaren) Bildkoordinaten (x_u, y_u) auf neue Koordinaten (x_d, y_d) verschoben. Diese Verschiebung δ auf der Bildebene wirkt auf jeden Punkt und ist nichtlinear, da sie eine Funktion der unverzerrten Punkte ist. Die neuen Koordinaten können damit einzeln ermittelt werden über:

$$\begin{aligned} x_d &= x_u + \delta_{x_u}(x_u, y_u) \\ y_d &= y_u + \delta_{y_u}(x_u, y_u) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Die Verschiebungsfunktion $\delta(x_u, y_u)$ ist damit abhängig von den unverzerrten Pixelpositionen (x_u, y_u) . Der konkrete Einfluss der radialen und tangentialen Verzerrung auf die Pixelpositionen im Bild wird dabei schematisch in Figur 2.15 aufgezeigt. Um die Auswirkungen der einzelnen Verzerrungskomponenten besser nachzuvollziehen, werden die radiale und tangentiale Verzerrung nun näher betrachtet.

2. Grundlagen

Radiale Verzerrung Die radiale Verzerrung macht sich im aufgenommenen Bild durch eine Krümmung der Szene an den Rändern bemerkbar und ist rotationssymmetrisch zur Hauptachse. Sie wird verursacht durch die fehlerhafte Lichtbrechung der Linse an den Randbereichen und tritt deshalb verstärkt bei kleinen Linsen auf. Wie in 2.15 dargestellt verändert sich durch die Verzerrung der radiale Abstand zum Hauptpunkt, wobei die Winkelposition konstant bleibt. Damit lässt sich die Verzerrung in Abhängigkeit des Abstands von der Hauptachse beschreiben als

$$\delta_r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + \dots \quad (2.7)$$

wobei $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

In Abhängigkeit von der unverzerrten Position ergeben sich die verzerrten Bildkoordinaten somit zu

$$\begin{aligned} x_v &= x \cdot (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \\ y_v &= y \cdot (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots), \end{aligned} \quad (2.8)$$

womit durch die Koeffizienten k_1 und k_2 die Stärke der Verzerrung abgebildet wird. x und y sind dabei normalisierte Bildkoordinaten, welche zum optischen Bildmittelpunkt verschoben und mit der Brennweite skaliert sind.

Tangentiale Verzerrung Die tangentielle Verzerrung verursacht eine axiale Verdrehung der Bildpunkte und verursacht in den Bildern vor allem eine Verstauchung oder Ausdehnung in den Ecken. Verursacht wird dieser Effekt durch eine nicht parallele Orientierung der Linse zum Bildsensor. Diese Verschiebung tritt oft auf, wenn die Linse nicht korrekt zur Hauptachse ausgerichtet ist, weshalb oft auch von Dezentrier-Verzerrung (engl. decentering distortion) gesprochen wird und somit auch immer eine radiale Verzerrung verursacht. Wie in 2.15 aufgezeigt, verschiebt sich durch die Verzerrung die Winkelposition, ohne einen Einfluss auf die Distanz zum Ursprung.

In Abhängigkeit der unverzerrten Bildkoordinaten verschiebt die tangentielle Verzerrung die Bildpunkte zu

$$\begin{aligned} x_v &= x + (2 \cdot p_1 \cdot x \cdot y + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2)) \\ y_v &= y + (p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2) + (2 \cdot p_2 \cdot x \cdot y)), \end{aligned} \quad (2.9)$$

mit p_1 und p_2 als Koeffizienten für die Verzerrungsstärke. Damit wird der Winkel zu den Bildachsen verschoben, bei konstantem Abstand zum Hauptpunkt.

Kombiniertes Verzerrungsmodell Um beide Einflüsse zu kombinieren, wird die radiale Verzerrung erweitert mit der tangentialen Komponente durch das Brown-Conrady-Modell [Brown, 1966]. Hierdurch lässt sich die resultierende Verschiebung der Bildpunkte berechnen zu:

$$\begin{aligned}\delta_x(x, y) &= 2p_1xy + p_2x^2 + 3p_2y^2 \\ &\quad + k_1x(x^2 + y^2) + k_2x(x^2 + y^2)^2, \\ \delta_y(x, y) &= 3p_1x^2 + p_1y^2 + 2p_2xy \\ &\quad + k_1y(x^2 + y^2) + k_2y(x^2 + y^2)^2.\end{aligned}\tag{2.10}$$

Das um Verzerrungen erweiterte Kameramodell ergibt sich somit zu

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= \mathbf{K}(x, y)R[I] - \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{X} \\ \text{mit } \mathbf{K}(x, y) &= \begin{pmatrix} \alpha_x & s & x_0 + \delta_x(x, y) \\ & \alpha_y & y_0 + \delta_y(x, y) \\ & & 1 \end{pmatrix}\end{aligned}\tag{2.11}$$

Korrektur der Verzerrung Nachdem die Beschreibung der Verzerrungen nun aufgestellt wurde, kann, falls die radialen und tangentialen Koeffizienten ermittelt wurden, die Verzerrung aus den Bildern herausgerechnet werden. Dazu werden für alle Pixelpositionen im Bild berechnet, welcher verzerrte Bildpunkt diesem entspricht. Somit kann ein künstliches entzerrtes Bild erstellt werden. Die Berechnung findet dabei über folgende Gleichungen statt:

$$\begin{aligned}x_v &= x + 2p_1xy + p_2x^2 + 3p_2y^2 \\ &\quad + k_1x(x^2 + y^2) + k_2x(x^2 + y^2)^2, \\ y_v &= y + 3p_1x^2 + p_1y^2 + 2p_2xy \\ &\quad + k_1y(x^2 + y^2) + k_2y(x^2 + y^2)^2.\end{aligned}\tag{2.12}$$

2.4.6. Mehransichten-Geometrie

Unter der Mehransichten-Geometrie (engl. Multiple-View-Geometry) versteht man die Betrachtung derselben Szene von zwei oder mehreren Positionen und Orientierungen aus. Sie umfasst die mathematische Beschreibung der Bilderfassung von diesen Posen aus und die Zusammenhänge dieser Bilder über Objekte in der Szene. Das Ziel dieser Beschreibung ist die Rekonstruktion der geometrischen Beziehungen zwischen Kameras und Objekten innerhalb der Szene. Dabei spielt es keine Rolle, ob tatsächlich mehrere physische Kameras verwendet werden, oder dieselbe Szene zeitlich verzögert durch dieselbe Kamera in verschiedenen räumlichen Posen erfasst wird. Die einzige Voraussetzung ist ein unveränderter Zustand der Szene oder die Information darüber, welche Teile sich verändert haben.

Im Rahmen der Arbeit werden nur zwei verschiedene Ansichten der Szene behandelt, weshalb nachfolgende Ausarbeitungen ausgehend von dieser Basis erfolgen. Zur Unterscheidung wird die zweite Kamera beziehungsweise Kameraposition zusätzlich gekennzeichnet. So wird ein Punkt X in Weltkoordinaten durch $x = P X$ in der ersten Ansicht und durch $x' = P' X'$ in der zweiten Ansicht auf Bildkoordinaten abgebildet.

Als Grundlage der Betrachtungen dient das mathematische Modell der Epipolargeometrie. Sie beschreibt die Zusammenhänge, die bei verschiedenen Ansichten derselben Szene auftreten. Eine einfache Skizze ist in Abbildung 2.16 gegeben.

Ein beliebiger Punkt p der Szene wird auf zwei verschiedene Bildpunkte abgebildet. Diese bezeichnen wir als x für die erste, und als x' bei der zweiten Kamera. Die Position der zweiten Kamera c' ist durch eine Translation t und ihre Orientierung durch eine Rotation R ausgehend von der ersten Kamera c gegeben. Der Punkt p sowie die beiden Kamerazentren spannen nun ein Dreieck auf, dessen Ebene als Epipolarebene bezeichnet wird. Die Bildpunkte x und x' befinden sich ebenfalls auf dieser Ebene, am Schnittpunkt der Bildebene der Kameras mit den jeweiligen Verbindungslinien zum Punkt p .

Die gesamte Schnittlinie der Epipolargeometrie mit der Bildebene wird als Epipolarlinie l bezeichnet und ist eine bedeutende Größe für Mehrkamera-

2. Grundlagen

Die Essential-Matrix beschreibt den Zusammenhang zwischen Bildpunkten und den dazugehörigen Epipolarlinien im anderen Bild. Diese lassen sich berechnen zu

$$\tilde{\mathbf{I}}' = \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\mathbf{x}} \quad \text{bzw.} \quad \tilde{\mathbf{I}} = \tilde{\mathbf{E}}^\top \tilde{\mathbf{x}}'. \quad (2.14)$$

2.5. Digitale Bildverarbeitung

Wie im Einleitungskapitel aufgezeigt, soll die hohe Auflösung des Scheinwerferprojektionssystems als Grundlage für die Lösung des Stabilisierungsproblems herangezogen werden. Hierzu ist eine Anpassung der aktuell projizierten Lichtverteilung, wie in Abschnitt 2.1.7 auf dem digitalen Bildarray notwendig, da die Bilder nur für den statischen Idealzustand vorberechnet werden. Diese Anpassung erfolgt auf Basis etablierter mathematischer Transformationen, die in den Grundzügen hier aufgezeigt werden sollen. Des Weiteren entstehen durch die begrenzte Auflösung des Projektionsrasters Artefakte, denen durch Filterverfahren entgegengesteuert werden muss. Die Ausführungen hier sollen die Themen in ihren Grundzügen aufzeigen, bevor sie im Detail in Kapitel 7 untersucht werden.

2.5.1. Darstellung auf dem Bildarray

Wie im Abschnitt 2.1.6 aufgezeigt, besitzen hochauflösende Scheinwerfersysteme eine digital ansteuerbare Bildmatrix für die Projektion verschiedener Symbole und Lichtverteilungen. Intern auf dem Steuergerät sind die einzelnen Bilder als Bitmap repräsentiert, und auch weitere Berechnungen und Transformationen werden auch auf dieser Basis durchgeführt. Sowohl DMD als auch μ LED-Architekturen bieten eine Helligkeitsverteilung über eine Bittiefe von 8, sind damit also in der Lage 256 verschiedene Helligkeitswerte darzustellen. Für die Projektion wird jedem Pixel nun ein Helligkeitswert zwischen 0 und 255 zugeordnet, wobei 0 einen ausgeschalteten Pixel und 255 einen maximal bestromten, also maximal hellen, Pixel darstellt. Beispielhafte Pixelstatus auf dem Bildarray für eine resultierende Abblendlichtverteilung sowie einer Symbolprojektion sind in den Abbildungen 2.17 und 2.18 dargestellt.

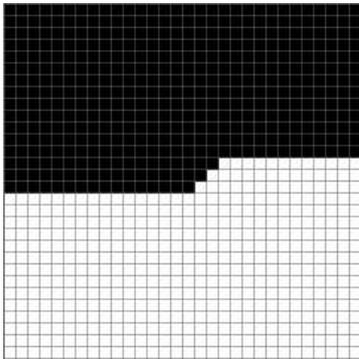
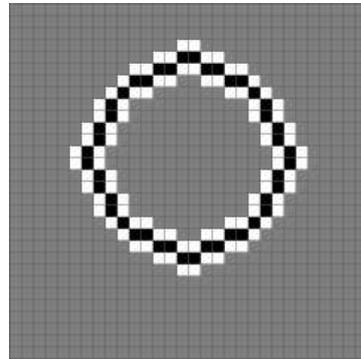


Abbildung 2.17.: Typische Lichtverteilung mit Anstieg

Abblend- mit

Abbildung 2.18.: Beispielhafte Symbolprojektion zwei verschachtelter Kreise



Zu beachten ist, dass in der Darstellung wie in der Computergrafik die Helligkeitsabstufungen als Grauwerte zwischen Weiß und Schwarz dargestellt werden, der Scheinwerfer aber keine Grauwerte, sondern Intensitäten darstellt. In den folgenden Abschnitten der Arbeit wird diese Darstellungsweise für schematische Darstellungen des Bildarrays jedoch der Einfachheit halber beibehalten. Je nach gewünschter Darstellung in der Umgebung, beispielsweise auf einer Wand parallel zur Fahrzeugfront oder der ebenen Fahrbahn, muss das gewünschte Symbol zwischen den Systemen für eine saubere Darstellung transformiert werden.

2.5.2. 2D-Transformation

Die im Fahrzeugsteuergerät hinterlegten Symbole sind entweder an eine Wand- oder eine Bodenprojektion vorgepasst. Darüber hinaus ist für die Projektionsstabilisierung bei isolierten Abweichungen vom Grundzustand, wie einem reinen Wanken des Fahrzeugs oder einem An- bzw. Abstieg der Fahrbahn, eine Verdrehung, Stauchung oder Verzerrung des ursprünglichen Bildes notwendig, um die ursprüngliche Darstellung wiederherzustellen. All diese Anpassungen können durch schlichte 2D-Transformationen auf der Bildmatrix über Transformationsmatrizen erreicht werden.

Hochauflösende Module wie DMD oder μ LED können als perspektivische

2. Grundlagen

Projektoren betrachtet werden. Dies wird leichter verständlich, wenn man den Scheinwerfer als inverse Kamera modelliert [Moreno und Taubin, 2012]. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2.4.4 zu den Kameraabbildungen projizieren Scheinwerfer ausgehend von einer zweidimensionalen Ebene, welche dem Mikrospiegel-Chip bzw. dem LED-Array entspricht, und über die kameraähnliche Optik die Bilder auf eine dreidimensionale Welt. Somit findet eine perspektivische Transformation bei der Projektion statt, welche mit einer entsprechenden weiteren perspektivischen Transformation auf der Bildmatrix kompensiert werden kann.

2.5.3. Projection-Mapping

Projection Mapping (PM) beschreibt eine Vielzahl an Verfahren, die Bilder und Videos von Projektionssystemen auf die zu projizierende Oberfläche anzupassen [Jones u. a., 2014]. Diese Anpassung kann aus geometrischen (variable und unterschiedliche Betrachter- und Projektionsflächenpositionen) oder textuellen Gründen (nicht-planare oder farbige Oberflächen) erforderlich sein [Mai, Le und Liu, 2017]. Dabei sind die verbreitetsten Anwendungen von PM Planetarien und Simulatoren, die sehr große und gekrümmte Projektionsflächen aufweisen, oder Lichtshows durch Gebäudeinstallationen für Vorführungen wie beispielsweise in Freizeitparks. Dabei wird die Projektion im Voraus speziell an die Gebäudeform und -textur angepasst und mit der Tiefenwirkung und einzelnen Bauelementen gespielt, um auffällige und immersive Animationen und Illusionen zu erzeugen.

Hierfür werden zum einen einzelne Bereiche der Projektion auf herausgearbeitete Teilebenen der Struktur transformiert, bei denen die relative Position bekannt ist. Durch diese Vereinfachung ist der Einsatz einer perspektivischen Transformation pro Flächenabschnitt möglich. Alternativ wird die gesamte zu projizierende Fläche, beispielsweise eine Gebäudefront, im Vorfeld eingescannt und in ein Renderingtool geladen. Dort erfolgt eine Einteilung des entworfenen Videos in Teilbereiche, welche händisch auf Abschnitte der Struktur gemappt werden. Anschließend werden die Projektorposition und die gewünschte Auflösung festgelegt und der angepasste Videostream gerendert.

Im Kontext der Projektionsstabilisierung ist ein Projection Mapping notwendig, da durch die disparate Lagebeziehung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn sowie der Unebenheit durch Straßenschäden oder andere Verkehrsobjekte es zu Verzerrungen und Veränderungen der Lichtverteilung aus der Sicht der Fahrzeuginsassen im Vergleich zum Grundzustand kommt. Diese können nicht mehr nur durch eine reine perspektivische Transformation korrigiert werden, da nicht mehr auf eine planare Fläche projiziert wird. Die benötigte Transformation ist für jede zusammenhängende ebene Fläche unterschiedlich, bei gekrümmten Oberflächen wie Geschwindigkeitsschwellen oder fein granularen Oberflächen wie Schlaglöchern muss sie sogar pixelweise erfolgen.

Bei fahrdynamisch sicherheitsrelevanten Fahrbahnhindernissen, wie die genannten Geschwindigkeitsschwellen und Schlaglöcher, sollte jedoch gleichzeitig die Projektionsanpassung die Sichtbarkeit der Objekte nicht einschränken. Diese ist notwendig, damit der Fahrzeugführer entsprechend während der Fahrt darauf reagieren und die Geschwindigkeit drosseln oder ein Ausweichmanöver fahren kann. Der Einfluss auf die Projektionswirkung wird in Kapitel 8 abschließend diskutiert.

Diese klassischen Verfahren des PM besitzen jedoch entscheidende Nachteile, welche einen Einsatz im geplanten System erschweren. Sie sind äußerst rechenaufwendig und benötigen dadurch oft ein Prerendering der gewünschten Projektion. Weiterhin wird eine manuelle Zuordnung und Orientierung der Tiefenmessungen auf die gewünschten Projektionstexturen benötigt, da oft keine Kopplung bzw. Kalibrierung der Systeme zur Tiefenmessung mit den Projektionssystemen vorhanden ist. Aus diesen beiden Gründen ist ein Echtzeiteinsatz nicht oder nur nach ausgiebiger Vorbereitung möglich.

Außerdem sind die Verfahren abhängig von einer möglichst umfassenden Beschreibung der jeweiligen Flächen, wo die Tiefeninformationen vollständig sind bzw. im vorhergehenden Schritt interpoliert werden, um mögliche Lücken zu schließen. Im Fahrzeug ist dies jedoch nicht der Fall, da durch die Messung des Frontfeldes in Echtzeit Werte in Teilbereichen aufgrund Verdeckung, Überstrahlung oder Decodierfehler fehlen. In diesen Bereichen muss eine pixelweise Korrektur erfolgen, welche diese Verfahren nicht ermöglichen. Dadurch sind diese Verfahren konzeptuell nicht für den

2. Grundlagen

Einsatz in der Projektionsstabilisierung geeignet und es muss ein angepasstes Vorgehen entwickelt werden, welches in Abschnitt 7.3 vorgestellt wird.

2.5.4. Bildberechnung

Bei der Berechnung der neuen Projektion auf Basis der Stabilisierungsinformation ist man auf die vorgeschichteten Texturen und bei der Umsetzung auf die Auflösung des Projektionsmoduls beschränkt. Dies führt bei Verschiebungen oder Verzerrungen zu einer starken Abnahme der wahrgenommenen Bildqualität durch Kantenflimmern. Weiterhin sind bei schnellen und/oder starken Verschiebungen sowie bei Eingangssignalen, die mit Rauschen überlagert sind, ruckartige Symbolbewegungen die Folge, welche unangenehm wirken und die Aufmerksamkeit des Fahrers vom Verkehrsgeschehen ablenken.

Um die Auswirkungen zu verringern, können verschieden Algorithmen und Verfahren angewandt werden, die nun aufgezeigt werden. Dabei wird immer von einer Helligkeitsausgabe wie im Scheinwerfer vorliegend ausgegangen, ohne Farbkanäle.

Texture-Filtering

Das Texture-Filtering (deutsch: Textur-Filterung) ist ein Verfahren, um eine Zuordnung zwischen der verwendeten Textur (im Fahrzeugscheinwerfer das vorgeschichtete Symbol oder die abgezielte Lichtverteilung) und den einzelnen Pixel des Wiedergabemediums (im Fahrzeug die Pixel des hochauflösenden Lichtmoduls) herzustellen und somit die anzuzeigenden Helligkeitswerte der Pixel zu berechnen.

Viele Standardverfahren, die aus der Computergrafik stammen, wie die anisotrope Filterung, nutzen ein Mipmapping als Grundlage ihrer Berechnungen. Als Mipmapping bezeichnet man eine Reihe von im Voraus berechneten Kopien der Textur/des Bildes mit immer geringerer und abnehmender Auflösung, bis zur Darstellung des ursprünglichen Bildes durch nur noch einen Pixel in der letzten Textur. Diese werden im Speicher abgelegt und je

nach Bedarf der Darstellungsgröße die Textur der entsprechenden Größe geladen. Mipmapping ist im Fahrzeugscheinwerfer jedoch zurzeit nicht anwendbar, da der Speicher im Steuergerät eine der größten Restriktionen im System darstellt und kein zusätzlicher Speicherplatz für die Texturkopien in der Serienarchitektur zur Verfügung steht. Weiterhin ist abseits von Symbolprojektionen die berechnete Lichtverteilung durch die adaptiven Lichtfunktionen hochdynamisch, weshalb keine direkte Vorberechnung möglich ist.

Aus diesen Gründen kann für die geplante Anwendung kein Mipmapping angewendet werden und es muss auf Alternativverfahren zurückgegriffen werden. Das weitverbreitetste darunter ist das Bilineare Filtern. Dabei werden die Zwischenwerte im Pixelgitter durch eine zweifache lineare Interpolation berechnet, bei der zuerst zwei Pixelwerte zu einer resultierenden Kantenhelligkeit verknüpft und anschließend zwei Kantenhelligkeiten zum resultierenden Helligkeitswert im gewünschten Punkt verbunden werden.

Als eine Erweiterung der Bilinearen Filterung findet auch oft die rechenintensivere Bikubische Filterung Verwendung. Diese ist genauer und hat den Vorteil einer höheren Akutanz, wodurch die Anzeige schärfer erscheint, kann aber bei unangepasster Verwendung zu Artefakten durch Clipping führen.

Anti-Aliasing

Das Anti-Aliasing erhält seinen Namen vom Alias-Effekt, der auftritt, wenn man eine Signalabtastung unterhalb der Nyquist-Frequenz vornimmt. Wie der Name verrät, wird Anti-Aliasing dafür eingesetzt, die durch das Aliasing verursachten Effekte zu kompensieren beziehungsweise zu minimieren. Da die im Fahrzeug eingesetzten Symbole jedoch speziell an die Auflösung der Lichtmodule im Scheinwerfer angepasst sind, treten diese Informationsverluste durch die Unterabtastung nicht bei der unstabilierten Projektion auf.

In dynamischen Szenarien spielt das Anti-Aliasing bei der Bekämpfung von Treppeneffekten, verursacht durch die begrenzte Projektionsauflösung, eine entscheidende Rolle, weshalb auch oft im Deutschen vereinfacht von

2. Grundlagen

Kantenglättung statt Anti-Aliasing gesprochen wird. Dies wird erreicht durch eine erweiterte Abtastung der Textur bei der Farb- bzw. Helligkeitszuordnung zu den Einzelpixeln des Ausgabemediums. In Kapitel 7 werden die unterschiedlichen Verfahren ausgewertet und am Scheinwerferbeispiel verglichen.

2.6. Bewegungskompensationssysteme

Unter Bewegungskompensation werden allgemein Technologien und Konstruktionen verstanden, welche dazu dienen, Bewegungen eines Objekts oder seiner Umgebung auszugleichen. Diese Kompensation kann hierbei die tatsächliche Bewegung eines Objekts im Raum ausgleichen, also mechanisch dieser Bewegung entgegenwirken oder nur die Auswirkungen dieser Bewegungen kompensieren, was meist nur in elektronischen Systemen möglich ist. Aus beiden Bereichen werden nun Beispiele vorgestellt, welche der Stabilisierungsaufgabe im Fahrzeug sehr nahekommen.

2.6.1. Mechanisch

Die breiteste Gruppe der Bewegungskompensationssysteme sind mechanische Aufbauten, die in verschiedenen Ausführungsvarianten die tatsächliche Bewegung eines Objekts im Raum ausgleichen. Dies kann passiv, durch eine spezielle Aufhängung, oder aktiv, durch dedizierte Aktoren, welche eine der ursprünglichen Bewegung entgegengesetzte Kraft induzieren, erreicht werden. In den folgenden Abschnitten sollen die relevantesten Systeme dargelegt werden.

Kamera-Bildstabilisierung

Die im Alltag am häufigsten angetroffenen Bewegungskompensationen stellen Systeme zur Verbesserung von Kameraaufnahmen unter dynamischen Bedingungen dar. Die Stabilisierung der Projektionsdarstellung ist verwandt

mit dieser Aufgabe der Bildstabilisierung, wie sie in immer mehr Kameras integriert wird.

Bei Einzelbildern sorgt die Bewegung der Kamera während der Belichtungszeit zu Expositionen von Sensorpixeln durch verschiedene Teile der Szene. Hierdurch kommt es zu unscharfen und falsch beleuchteten Bildern. Bei Videoaufnahmen kann es darüber hinaus bei starken oder hochfrequenten Bewegungen der Kamera zu einer verwackelten und unkenntlichen Aufnahme kommen. Um diese Probleme zu lösen, versuchen diese Systeme die relevanten Bewegungen der Kamera auszugleichen, wobei dies sowohl extern durch spezielle Aufbauten als auch intern durch eine Kompensation der Bewegungen im Abbildungspfad bzw. durch eine Nachbearbeitung der Bilder geschehen kann.

Gimbal Gimbals sind spezielle mechanische Aufhängungen für Kameras, welche bis zu drei rotatorische Freiheitsgrade erlauben. Das Grundprinzip hierbei ist die kardalische Aufhängung, bei der zwei zueinander rechtwinklige Drehlager dafür sorgen, dass das befestigte Objekt unabhängig von der Lage und Drehung des Außengehäuses kein Nicken oder Rollen gegenüber dem Weltkoordinatensystem, also dem Erdgravitationsvektor, erfährt.

Für den Einsatz mit Kameras werden diese häufig um einen weiteren rotatorischen Freiheitsgrad um die Gierachse erweitert. Sie sorgen damit dafür, bei Bewegungen des Kameraträgers die Rotationen auszugleichen, und damit ein Blurring bei Bildern und ruckartige Bewegungen bei Videoaufnahmen zu verhindern. Zusätzlich werden Kameragimbals oft an allen Drehachsen mit Elektromotoren ausgestattet, um auf Basis von Sensorinformationen verbleibende Bewegungen auszugleichen, die durch die Aufhängung nicht komplett kompensiert werden können. Weiterhin kann durch sie eine gewünschte Verdrehung manuell herbeigeführt werden. Die Ansteueralgorithmen basieren dabei meistens auf üblichen PID-Controllern [Rajesh und Kavitha, 2015][W. Wang und Rana, 2020].

Optische Bildstabilisierung Die optische Bildstabilisierung (engl. Optical Image Stabilization, kurz OIS) ist die Implementierung dieser Grundprinzipien direkt in den optischen Kanal des Kameraaufbaus mitsamt des

2. Grundlagen

Bildsensoren, ohne zusätzliche externe Komponenten. Dabei wird nicht die komplette Optik samt Sensor frei gelagert, sondern in zwei verschiedenen Ausführungsformen entweder die Linse oder der Sensor (auch als Sensor-Shift-Stabilization, kurz SSS bezeichnet) der Kamerabewegung entgegengesetzt bewegt. Hierfür werden durch eine integrierte inertielle Messeinheit die Bewegungen erfasst und durch eine Vielzahl an kleinen Aktuatoren die Linse bzw. der Sensor verschoben.

Da durch die Linsenstabilisierung direkt der Lichteinfall auf den Sensor korrigiert wird, sind hier häufig bessere Stabilisierungsergebnisse erzielbar. Durch die oft geringere Masse und damit Trägheit des Sensors können durch die SSS jedoch bei ähnlicher Aktuatorik mehr Verstellungen pro Zeiteinheit erfolgen. So können beispielsweise bei Handykameras 5000 Positionen pro Sekunde per SSS angesteuert werden, im Vergleich zu etwa 1000 bei Linsenstabilisierungen. Hierdurch können durch die SSS sogar oft bessere Ergebnisse erzielt werden.

Nachteile der OIS sind vor allem der erhöhte Bauraumbedarf und der begrenzte Regelbereich, der durch die Bauform der Kamera auf natürliche Weise begrenzt ist.

Weitere Anwendungsgebiete

Neben der bekannten Anwendung in der Fotografie gibt es weitere Felder, in denen eine Kompensation der Bewegung nötig ist, welche hier vorgestellt werden sollen.

Geschützsysteme Ein weiteres bekanntes Beispiel einer Bewegungskompensation stellen die Feuer- und optischen Zielerfassungsanlagen von Geschützsystemen dar. Beispielfähig seien hier Kampfpanzer genannt, die bereits im Zweiten Weltkrieg einfache mechanische Kreisel zur Bewegungserfassung zum Ziel der korrekten Ausrichtung der Hauptkanone besaßen. So sollten unabhängig von der Bewegung der Fahrzeugwanne bei der Fahrt durch das Gelände Objekte und Ziele in der Umgebung anvisiert und bekämpft werden können.

Erste Varianten besaßen mechanische Winkel- und Winkelgeschwindigkeitsgeber, welche die Bewegung durch Resolver in elektrische Signale übertrugen. Auf Basis von summiertem Winkel- und Winkelgeschwindigkeitssignal als Regelsignal wurde anschließend durch das hydro-pneumatische System die Zieloptik bzw. das Geschütz nachgeführt. In neueren Ausführungen wurden die mechanischen Messkreisel durch robustere und genauere Laserkreisel ersetzt.

2.6.2. Elektronisch

Neben der tatsächlichen Kompensation der Bewegungen gibt es abhängig von der Anwendung auch die Möglichkeit, nur die Auswirkungen der Bewegungen auszugleichen. Dies ist vor allem bei bildgebenden und -projektiven Systemen möglich, bei denen den Verschiebungen auf dem Bildarray entgegengewirkt werden kann.

Kamera-Bildstabilisierung

Die elektronische Bildstabilisierung (engl. Electronic Image Stabilization, EIS) [M. Tico und M. Vehvilainen, 2007] ist ein Verfahren, um ohne mechanische Komponenten den Einfluss von Kamerabewegungen auf die Bildaufnahme zu minimieren. Dazu werden die Bilder nach der Aufnahme beschnitten und die zentralen, zwischen aufeinanderfolgenden Frames zusammengehörigen Bildbereiche zusammengelegt. Dadurch wird der äußere Bildbereich geopfert und als Regelbereich ähnlich der mechanischen Aufhängung beim OIS verwendet, um ein verwacklungsfreies Bild zu erhalten.

Die Information über die Bewegung wird dabei ebenfalls über Inertialsensorik erfasst und in entsprechende Bildbereiche der einzelnen Frames umgerechnet. Hierbei ist eine genaue Synchronisation der Sensormesswerte zu den Kameraframes essenziell. Alternativ oder zusätzlich kann durch eine Merkmalsextraktion und Feature Matching auf den Einzelframes ein direkter positioneller Zusammenhang berechnet und damit die Bewegung zwischen den Frames ermittelt werden. Die reine Korrektur der Bilder ohne

2. Grundlagen

Sensorinformationen wird dabei meist nur als digitale Bildstabilisierung bezeichnet.

Augmented Reality

In Augmented Reality Anwendungen werden zusätzliche Informationen in die aktuelle Umgebung und Szene eingebettet. Dabei sind diese allein für den menschlichen Nutzer gedacht und werden übermittelt durch eine zusätzliche Anregung der Wahrnehmung, überwiegend über den Sehsinn. Dazu werden aus dem aktuellen Kamerabild des Umfelds Merkmalspunkte extrahiert und Zusatzinhalte im entsprechenden Blickfeld eingeblendet. So kann beispielsweise beim Betrachten des eigenen Kühlschranks der Inhalt oder eine Einkaufsliste von aufgebrauchten Produkten angezeigt werden.

Bekanntere Beispiele zur Umsetzung sind separate Tragebrillen wie Google Glass oder Microsoft HoloLens, welche auf Basis des aktuell über die Kamera und weiteren Sensoren erfassten Umfelds Zusatzinformationen in festgelegte Punkte einbinden. Dabei wird die Bewegung des Nutzers und die Änderung der Blickrichtung kompensiert, so dass die Einblendung ortsfest auf dem Objekt verbleibt. Im automobilen Umfeld findet Augmented Reality bisher vor allem bei Navigationsfunktionen Anwendung. So werden Zielführungshinweise und POIs in den Videofeed auf einem Bildschirm oder direkt in die Umgebung über das Head-Up-Display integriert.

Für beide Anwendungsfälle erfolgt die Erfassung der Bewegung des Fahrzeugs bzw. der Brille über die eingebaute Inertialsensorik, und die Augenbewegung wird über Eye-Tracker-Kameras mitverfolgt.

2.7. Versuchsträger

Für die prototypische Integration des Gesamtsystems wird ein Versuchsträger auf Basis eines Serienmodells verwendet, welches den technischen Anforderungen entsprechend umgebaut wird. So wird eine E-Klasse der Baureihe 213 verwendet, mit einem Scheinwerferaufbau basierend auf μ LED. Das Fahrzeug ist in Abbildung 2.19 zu sehen.



Abbildung 2.19.: Darstellung des eingesetzten Versuchsaufbaus

Für die Implementierung der Teilfunktionen der Bildstabilisierung ist im System ein besserer Zugriff auf die weiteren Teilkomponenten im Fahrzeug notwendig. So muss neben den weiteren Sensorinformationen im Fahrzeugbus, wie dem Inertialsensor, ein Zugriff auf Rohkamerabilder sowie die Anpassung seiner Eigenschaften, wie der Belichtungszeit, für die Implementierung der Strukturierten-Licht-Anwendung möglich sein. Für diese Betrachtungen ist eine zusätzliche DSLR auf der Windschutzscheibe angebracht, welche über die Toolbox DigiCamControl eine einfache Datenübertragung und Verwaltung der Parameter ermöglicht. Weiterhin wird eine Intel RealSense D455 als Referenzmesssystem der Fahbahnrekonstruktion verwendet.

Die nötigen Berechnungsschritte sowie die komplette Stabilisierungsfunktion sollen dann auf einem zusätzlichen Rechner im Fahrzeug erfolgen, auf dessen Basis die Manipulation der dargestellten Lichtverteilung der

2. Grundlagen

Scheinwerfer erfolgt. In Abbildung 2.20 ist der Gesamtaufbau vereinfacht dargestellt.

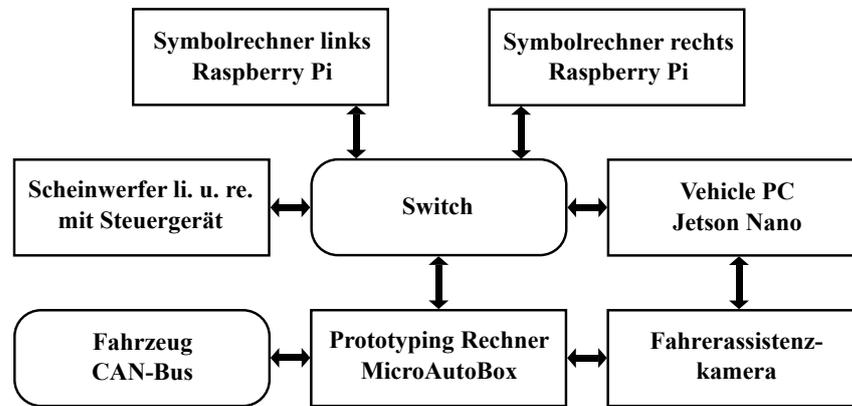


Abbildung 2.20.: Schematischer Signalaufbau der prototypischen Fahrzeugintegration

3. Theoretische Betrachtungen

Nachdem die im Fahrzeug vorhandenen Systeme vorgestellt wurden, wird in diesem Kapitel die Stabilisierungsaufgabe genauer erfasst. Für eine umfassende Beschreibung werden sowohl die einzelnen Problemkomponenten und ihre Auswirkungen als auch die Steuerungsmöglichkeiten zur Anpassung aufgezeigt. In diesem Rahmen werden die Gesamtsituation der Projektion aus dem Fahrzeug, die verwendeten Komponenten und die zur Verfügung stehende Sensorik näher betrachtet.

3.1. Aufgabendefinition

Bei der Projektion des Symbols auf einen Punkt vor das Fahrzeug kommt es nun während der Fahrt aufgrund von Änderungen der Straßentopografie und der Dynamik des Fahrzeugs zu Verschiebungen und Verzerrungen. Wenn die Fahrbahn vor dem Fahrzeug erfasst ist und die Bewegungen des Fahrzeugs bekannt sind, kann die Lichtprojektion durch die Scheinwerfer auf Basis dieser Information angepasst werden.

Da die Abbildung aufgrund der Projektionsgeometrie von vielen verschiedenen Komponenten abhängt, wird die Beschreibung der Anpassung in der Arbeit in verschiedene Subkomponenten unterteilt. Die Einflüsse auf die Projektion lassen sich dabei hauptsächlich aus zwei Richtungen betrachten:

1. Eine alleinige Betrachtung der Verschiebungen der einzelnen angesteuerten Pixel, welche ein Symbol oder eine Lichtverteilung zusammensetzen, verursacht alleinig durch die dynamischen Bewegungen der gefederten Fahrzeugmasse und damit der verbauten Scheinwerfer.

3. Theoretische Betrachtungen

Durch diesen Einfluss ändert sich laufend die Entfernung der Projektionsfläche der Pixel vom Fahrzeugscheinwerfer und es kommt zu Verschiebungen des Symbols sowie einer Verzerrung durch unterschiedliche Verschiebungen der einzelnen Symbolpixel.

2. Eine komplexe Betrachtung der Symboltransformation aus Sicht des Fahrers, verursacht beispielsweise durch Unebenheiten und Neigungen der Straße, sowie Verwindungen der Projektionsfläche.

Die als Zweites aufgezählte genaue Anpassung an die Fahrbahnoberfläche erfordert hochgenaue Informationen über die Struktur und ist äußerst anfällig für kleine Fehler bei der Bestimmung. Außerdem ist ihre Auswirkung auf die Erkennbarkeit der Projektionen in den meisten Fällen sehr gering. Deshalb soll zuerst eine Beschreibung nur für die Kompensation der Scheinwerferbewegungen erstellt werden, die dann durch eine darauffolgende Kompensation der Fahrbahnstruktur ergänzt wird.

Im ersten Schritt werden für den Aufbau des Systems die Voraussetzungen betrachtet und die Struktur des Algorithmus hergeleitet. Danach folgt eine kleine Einführung in den Fahrzeuggrundzustand, auf dessen Basis die Scheinwerferprojektionen bei der Entwicklung initial entworfen werden. Diese Beschreibung bildet die Grundlage, wie die aktuell angesteuerte Lichtverteilung visuell zu wirken hat, und bietet den Startpunkt für die mathematische Darstellung der auftretenden Projektionsabweichungen.

3.1.1. Systemaufbau

Die in Abschnitt 2.6 vorgestellten Systeme zur Bewegungskompensation sind für Projektionen im Scheinwerfer nur bedingt übertrag- und nutzbar. Dies liegt zum einem daran, dass im Scheinwerfer die Lichtmodule aus Platz- und Haltbarkeitsgründen nur eingeschränkt beweglich gelagert werden, mit einem einzigen rotatorischen Freiheitsgrad. Zum anderen sind Scheinwerfer projektive Systeme, bei denen die Bildausgabe in Echtzeit stattfindet und dadurch die Projektion im Vergleich zu Videoaufnahmen nicht im Nachhinein bearbeitet werden kann. Weiterhin weist die Fahrt im Fahrzeug eine andere Dynamik auf, so dass allein die Bewegung relativ

zur Fahrbahn kompensiert und die erfasste Gesamtbewegung des Fahrzeugs in die entsprechenden Komponenten aufgeteilt werden muss. So entstehen beispielsweise durch die hohen Fahrgeschwindigkeiten signifikante Bewegungskomponenten aufgrund von Steigungsänderungen der Fahrbahn, welche jedoch keine oder geringe Auswirkungen auf die Projektionsdarstellung haben und abgekoppelt von der Stabilisierungsaufgabe behandelt werden müssen.

Somit verbleibt als technische Möglichkeit nur eine „reaktive“ Steuerung des Lichtbilds auf Basis der erfassten und bearbeiteten Fahrzeug- bzw. Scheinwerferbewegungen. Dabei kann jedoch auf einzelne Elemente der in Abschnitt 2.6 vorgestellten Kompensationssysteme aufgebaut werden. Diese sind zum einen die Echtzeitfähigkeit von Gimbal- und Geschützsystemen, und zum anderen die Bildtransformation und Einbettung von Augmented-Reality-Systemen.

So müssen elektrisch unterstützte Gimbals ebenfalls reaktiv auf vergangene Sensormessungen reagieren und diese rechtzeitig in Steuersignale für die latenzbehafteten Elektromotoren umsetzen. Zwar kann hierbei im Unterschied zum Scheinwerfer die gesamte Drehbewegung direkt und nicht nur deren Auswirkung kompensiert werden, jedoch ist im hochfrequenten Bereich die ausreichend schnelle Kompensation eine wichtige Eigenschaft, die auch im Scheinwerfersystem übernommen werden soll.

Ergänzend hierzu muss die im Fahrzeug implementierte AR-Funktion des Head-Up-Displays eine der Symbolanpassung vergleichbare Aufgabe lösen, indem eingeblendete Symbole wie Pfeile vor dem Zielobjekt ortsfest in der realen Umgebung, beispielsweise einer Fahrspur, platziert werden müssen. Dieses System muss daher ebenfalls die durch die Fahrzeugbewegungen induzierten Verschiebungen auf die Darstellung kompensieren. Weiterhin ist der Sichtstrahl des Fahrers, und damit die korrekte Darstellung über die Projektionsscheibe, abhängig von der Augenposition des Fahrers sowie der relativen Position der Fahrbahn. Jedoch gibt es auch große Unterschiede bei den Rahmenbedingungen: Die Einblendung im HUD ist durch das Fahrzeug-Chassis zu einem großen Teil direkt mit dem Blick und der Bewegung des Fahrers gekoppelt, weshalb keine signifikanten Verzerrungen der eingeblendeten Symboliken auftreten. Dadurch muss nur die reine zweidimensionale Position in der Anzeige verändert und angepasst werden.

3. Theoretische Betrachtungen

Außerdem werden nur Drehungen um die y-Achse kompensiert, da der Einfluss der Wankbewegungen als niedrig und nicht relevant angesehen wird. Hierdurch sind die Anforderungen an das System deutlich gelockert und die Bestimmung des Einblendebereichs durch die Kamera sowie eine einfache Nickkompensation im hochdynamischen Bereich für den Betrieb ausreichend.

Das zu entwickelnde Gesamtsystem muss im Gegensatz zu diesen beiden Kompensationssystemen die Auswirkungen der kompletten Fahrzeugbewegungen, wie im Abschnitt über die Symbolverschiebungen betrachtet, auf die Symboldarstellung ausgleichen. Hier ist die Symbolposition an sich direkt abhängig von der Gesamtsituation aus Fahrzeugdynamik und Fahrbahnumfeld, wodurch die Projektion entsprechend durch eine digitale Steuerung der Bildpixel angepasst werden muss.

Aus diesen Gründen wird als Basis für die Projektionsstabilisierung im Scheinwerfer ein mathematisches Modell für die Bewegungen des mit der Fahrzeugkarosserie gekoppelten Scheinwerfers aufgestellt, welches mit einem Fahrwerksmodell hinterlegt wird. Aufbauend auf verschiedenen Sensorinformationen kann damit die Bewegung des Scheinwerfers relativ zur Fahrbahn bestimmt werden.

Um im nächsten Schritt die notwendige Anpassung der Lichtverteilung zu berechnen, wird zu jedem Zeitpunkt aus diesen Informationen die Pose des Scheinwerfers abgeleitet und die Differenz zum Grundzustand bestimmt. Dabei wird immer von einer ebenen Fahrbahn als Projektionsfläche ausgegangen, auf deren Basis die notwendigen Verschiebungen und Transformationen berechnet werden.

Zuallerletzt wird die Projektion an die tatsächliche Beschaffenheit der Fahrbahn angepasst, um eine Darstellung so zu erhalten, wie wenn die Fahrbahn eben wäre und sich parallel zum Straßen-KS befinden würde. Dies wird erreicht, indem die zuvor erfasste Fahrbahnstruktur entsprechend der Scheinwerferbewegung transformiert und das Delta zu einer theoretisch ebenen Fahrbahn ermittelt wird. Anschließend wird mittels Projection Mapping die Lichtverteilung entsprechend angepasst.

Auf diese Weise ist das System modular implementierbar und das rechenaufwändige Projection Mapping optional zuschaltbar.

3.1.2. Grundzustand

Alle Lichtprojektionen des Scheinwerfers sind in Bezug auf den Fahrzeuggrundzustand entworfen, auf dessen Basis auch die initiale Kalibrierung des Scheinwerfers erfolgt, welche die Orientierung der Lichtmodule im Scheinwerfergehäuse festlegt. Diese ist wichtig für die korrekte Wirkung der entsprechenden Standard-Lichtverteilungen, wie das Abblendlicht. Für die Kalibrierung sind in der UN ECE 48 [UNECE, 2019] alle Rahmenbedingungen festgelegt, da die Fahrzeugorientierung abhängig von der vorliegenden Zuladung ist. Für die Kalibrierung müssen deshalb alle Betriebsflüssigkeiten eingefüllt sein und das Fahrzeug eine Tankfüllung von 50 % aufweisen. Außerdem muss sich ein Gewicht von 80 kg auf dem Fahrersitz befinden, um einen entsprechenden Fahrer abzubilden. Um weiterhin Einflüsse der Gravitation auszuschließen, muss sich das Fahrzeug auf einer ebenen Fläche orthogonal zur Erdgravitation befinden. Diese Geometrie ist in Abbildung 3.1 schematisch aufgezeigt.

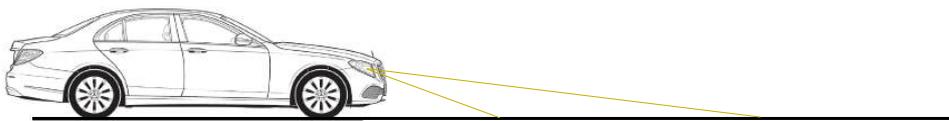


Abbildung 3.1.: Seitlich Ansicht der Projektionsgeometrie im Grundzustand

Diese Einstellung wird nun auch als Ausgangslage für die Auslegung der Symbolprojektionen des Systems herangezogen. Wie in Abschnitt 2.1.7 aufgezeigt wurde, sind die für die Projektionsstabilisierung relevanten Symbolprojektionen die Bodenprojektionen, da diese während der Fahrt stattfinden. Diese Projektionen sind so entworfen, dass die Darstellung für den Fahrer ideal ist, wenn das Symbol auf die ebene Fahrbahn vor dem Fahrzeug projiziert wird. Deshalb wird eine feste perspektivische Transformation auf das Bild angewendet, bevor es projiziert wird. In Abbildung 3.2 ist diese Modifikation am Beispiel einer Pfeilprojektion dargestellt.

Diese Transformation ist dabei fest und wird für jedes Symbol der Bodenprojektion gleichermaßen angewendet. In Kapitel 7 werden die Details zur Berechnung näher vorgestellt. Ändert sich nun während der Fahrt die Positionierung und Orientierung des Scheinwerfers gegenüber der ebenen

3. Theoretische Betrachtungen

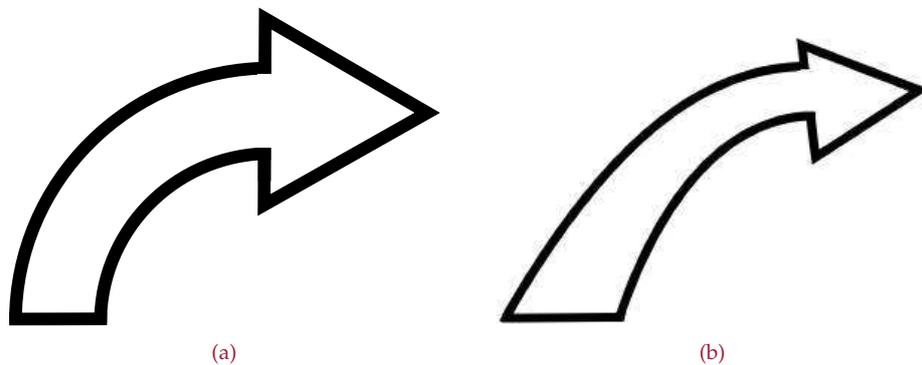


Abbildung 3.2.: (a) Als Bodenprojektion anzuzeigendes Symbol (b) Perspektivische Transformation der Symboldarstellung vor der Projektion

Fahrbahn oder ändert sich die Beschaffenheit der Fahrbahn im Projektionsbereich, ist diese eingespeicherte feste Transformation nicht mehr gültig, und es kommt zu Verschiebungen und Verzerrungen der Darstellung.

3.2. Variation der Projektionsgeometrie

Wie bereits aufgezeigt, lassen sich die Veränderung der Projektionsgeometrie während der Fahrt auf die zwei Hauptkomponenten der Fahrzeugdynamik und Scheinwerferbewegungen einerseits und dem Wandel der Projektionsfläche bei der Überfahrt durch Topographieänderungen der Fahrbahn andererseits unterteilen. In diesem Abschnitt werden die Einflüsse auf die Projektion in die zwei Komponenten der Fahrzeug- bzw. Scheinwerferbewegungen und der Fahrbahn- bzw. Projektionsflächenveränderung unterteilt und ihre Auswirkung dargelegt.

Die unter diesen dynamischen Situationen stattfindenden Änderungen der Projektionsgeometrie und damit der Projektionsdarstellung müssen quantitativ beschrieben werden, um auf dieser Basis eine Kompensation berechnen und durchführen zu können. Diese Betrachtungen werden getrennt für die beiden Einflusskomponenten durchgeführt, bei welchen die jeweiligen Auftrittsvarianten aufgezeigt und die Wirkung auf die Symbolprojektion

analysiert werden. Dies ist notwendig, um im nächsten Schritt die für den Ausgleich nötige digitale Bildtransformation beschreiben zu können.

3.2.1. Fahrzeug- und Scheinwerferbewegungen

Den größten Einfluss auf das sichtbare Lichtbild in dynamischen Situationen während der Fahrt haben die induzierten Bewegungen des Scheinwerfers relativ zur Fahrbahn. Wie im Einleitungskapitel behandelt, sind die dynamischen Bewegungen des Fahrzeugs der größte Faktor bei der Verschiebung der dargestellten Symbole.

Für eine Analyse der Auswirkungen auf die Projektion wird die Dynamik des Fahrzeugs in verschiedenen Situationen sowie die Auswirkung auf die ausgestrahlte Lichtverteilung beschrieben.

Fehler durch veränderte Projektionsgeometrie

Der größte Einfluss auf die Sichtbarkeit der dargestellten Symbole auf der Fahrbahn erfolgt durch die hochdynamischen Rotationsbewegungen der gefederten Fahrzeugmasse um ihren Drehpunkt. Diese Bewegungen werden verursacht durch verschiedene Beschleunigungskräfte, die während der Fahrt auf die Fahrzeugmasse wirken: Antriebs- und Bremsbeschleunigungen sowie Anregungsbeschleunigungen, verursacht durch Fahrmanöver, Fahrbahnunebenheiten oder Wind.

Darüber hinaus kann sich jedoch auch die absolute Lage des Scheinwerfers im Bezug zur Fahrbahnebene verändern.

In Abbildung 1.2 aus Kapitel 1 ist der Einfluss von Fahrbahnunebenheiten auf die Symboldarstellung am Beispiel einer großen Bodenwelle bereits exemplarisch dargestellt worden. Die Anregung durch die Fahrbahn bei Überfahrt der Welle führt im Vergleich zum Grundzustand 1.2a in Bild 1.2b zu einer dynamischen Nickbewegung des Fahrzeugs und damit der integrierten Projektionsscheinwerfer.

Durch das herbeigeführte Eintauchen der Fahrzeugfront kommt es zu einer Verschiebung des Zebrastrreifens hin zum Fahrzeug, wie im zweiten Bild

3. Theoretische Betrachtungen

deutlich zu erkennen. Verursacht wird dies durch den veränderten Winkel der Leuchtebene der Scheinwerfer zur Fahrbahnebene und der gleichzeitig verringerten Höhe zur Fahrbahn. Deutlich zu erkennen ist dieser Effekt auch an der äußerst tiefen Position der Hell-Dunkel-Grenze der Lichtverteilung.

Im weiteren Verlauf der Überfahrt taucht die Fahrzeugfront erneut auf und das Symbol bewegt sich auf der Fahrbahn vom Fahrzeug weg. In Bild 1.2c ist der Nickwinkel des Fahrzeugs zur Straßenoberfläche schließlich so groß, dass das Symbol nicht mehr auf die Straße fällt.

Jedoch ist der Effekt der Bewegungen nicht nur auf den Symbolort begrenzt. Abhängig von der Entfernung der Projektionsfläche zum Scheinwerfer verändert sich auch die Symbolgröße. Diese Veränderung entsteht durch die Tatsache, dass man die Lichtquelle in erster Vereinfachung als Punktquelle betrachten kann. Durch die Linse im Scheinwerfer das Licht der gewünschten Verteilung entsprechend zerstreut - je länger der Propagationspfad, desto größer wird die durch einen Einzelpixel beleuchtete Fläche. Der umgekehrte Fall ist in Bild 1.2b durch kleinere Streifen deutlich sichtbar.

Dieser Effekt führt zeitgleich auch dazu, dass die Beleuchtungsstärke der Projektionen nach dem Entfernungsgesetz quadratisch proportional zur Projektionsentfernung abnimmt. Der Zusammenhang ist deutlich anhand des dargestellten Zebrastrreifens ersichtlich, welcher mit zunehmender Entfernung zum Fahrzeug deutlich dunkler wirkt.

Zusätzlich zu den in diesem Beispiel betrachteten Nickbewegungen kommt es mitunter auch zu deutlichen Wankbewegungen des Fahrzeugs, die das dargestellte Symbol entsprechend in der Fahrtachse verdrehen. Der Einfluss dieser Bewegungen auf das sichtbare Symbol ist jedoch deutlich geringer, da in diesem Fall die auftretenden Winkel und Bewegungen konstruktionsbedingt geringer sind. So können die während der Fahrt auftretenden Wankwinkel zwar wie der Nickwinkel Größenordnungen von bis zu $\pm 5^\circ$ erreichen, jedoch treten solche Extremwerte deutlich seltener auf. Darüber hinaus verändert sich die Entfernung der Lichtquelle zur Auftrefffläche nicht grundlegend, womit keine große Verzerrung oder Verschiebung stattfindet.

Bei zusammengesetzten Symbolen aus beiden Scheinwerfern kann es dennoch zu einer wahrnehmbaren Verzerrung des Symbols aufgrund der unter-

schiedlichen vertikalen Höhen der Scheinwerfer von der Fahrbahn kommen. Diese Effekte sollen im nächsten Abschnitt erläutert werden.

Fehler durch verteilte Symboldarstellung

Einige Symbole werden vom Fahrzeug gemeinsam durch die beiden Scheinwerfer rechts und links dargestellt. Als Beispiel sei hier erneut der Zebrastrifen aus Abbildung 1.2 herangezogen. Bei diesem Symbol werden die drei linken vertikalen „weißen“ Streifen durch den linken Scheinwerfer und die drei rechten Streifen durch den rechten Fahrzeugscheinwerfer projiziert. Diese Aufteilung ist in Skizze 3.3 noch einmal aus der Vogelperspektive aufgezeigt.

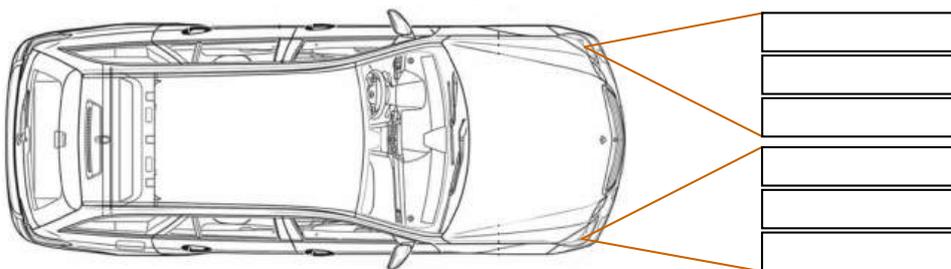


Abbildung 3.3.: Projektion eines Zebrastrifens verteilt über beide Scheinwerfer

In Bild 2 der Abbildung 1.2 während der Überfahrt der Bodenwelle ist der Einfluss dieser Verteilung bei Nicksituationen, die sich vom Grundzustand unterscheiden, deutlich zu erkennen. Durch das Eintauchen der Fahrzeugfront ist die Leuchtweite der Scheinwerfer verringert und die Symbolprojektionsfläche verschiebt sich in Richtung Fahrzeugfront. Durch die geometrische Position der Scheinwerfer am Fahrzeug, die einen großen lateralen Versatz aufweisen, können die Strahlen durch die geringere Auftreffentfernung nicht mehr konvergieren. Dadurch sind die Projektionsanteile der beiden Scheinwerfer deutlich voneinander abgetrennt und das dargestellte Symbol selbst verliert seine visuelle Wirkung als Fußgängerüberweg. Ein inverses Verhalten ist beim Auftauchen der Fahrzeugfront zu beobachten, bei welchem die Symbolprojektionen sich vom Fahrzeug entfernen und die Streifen sich überlappen.

3. Theoretische Betrachtungen

Noch deutlicher tritt dieser Effekt bei zusammengesetzten Symbolen in Erscheinung. Diese besitzen an der Projektionsgrenze zwischen linkem und rechtem Scheinwerfer eine Darstellung ohne Gradienten, wie in Abbildung 3.4 schematisch am Beispiel einer Pfeilprojektion dargestellt. In diesem Fall ist bei kleinsten Fahrzeugbewegungen weg vom Grundzustand eine Überlappung oder Divergenz der Projektionsbereiche wahrnehmbar.

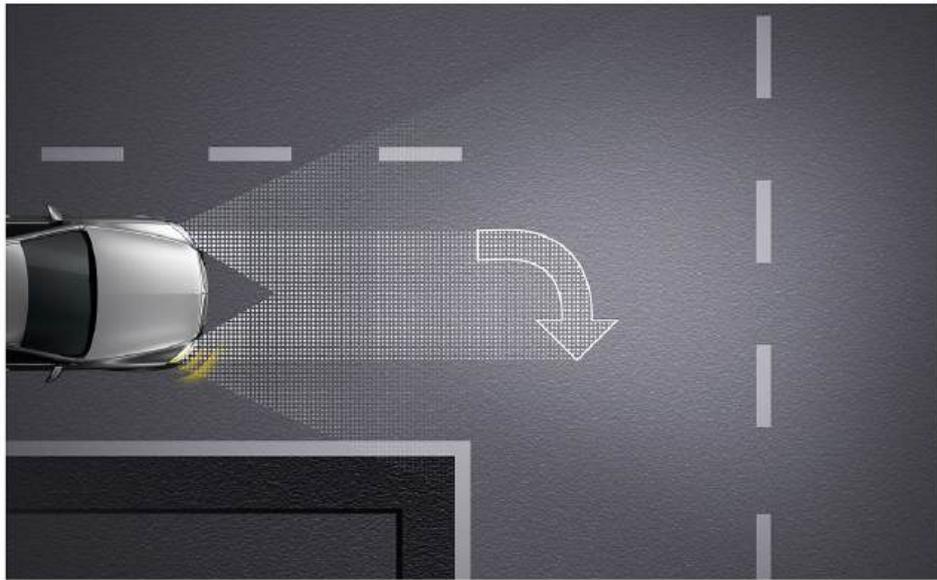


Abbildung 3.4.: Schematische Projektion eines Navigationssymbols aus der Vogelperspektive

Diese Art von Projektionen wird jedoch aufgrund der hohen Suszeptibilität für Variationen und der damit verknüpften unsauberen Darstellung nicht in Seriensystemen verwendet. Aus diesem Grund wird dieser Sachverhalt innerhalb der Arbeit nicht näher betrachtet. Solche eine Projektion wird praktischerweise besser dargestellt, indem entweder der Überlappungsbereich mit einem abnehmenden Helligkeitsgradienten zum Kreuzungspunkt hin dargestellt, die Einzelprojektion auf einen Scheinwerfer begrenzt oder das Symbol in zwei klar voneinander abgrenzbare Bereiche aufgeteilt wird, ähnlich dem bereits diskutierten Fußgängerüberweg.

3.2.2. Einflusskomponenten

Nachdem der Einfluss der Scheinwerferbewegungen auf die Symboldarstellung aufgezeigt wurde, werden nun die Einzelkomponenten analysiert. Es soll abgegrenzt werden, welche der Fahrzeugbewegungen überhaupt eine Rolle bei der Symbolprojektion spielen. Dazu werden die Rotations- und Translationsbewegungen getrennt evaluiert und auf ihre maximale Wirkung auf die Projektion hin untersucht.

Rotation

Die drei Rotationsbewegungen im Fahrzeug setzen sich wie aufgezeigt aus dem Nicken, Wanken und Gieren zusammen. Die Auswirkung auf die Projektion wird im Folgenden einzeln betrachtet.

Beim Gieren kommt es zu einer Verdrehung des Fahrzeugs um seine Hochachse. Dabei erfolgt jedoch im Vergleich zur Fahrbahnebene keine Veränderung und das horizontierte KS wird entsprechend mit dem fahrzeugfesten KS gemeinsam rotiert. Damit gibt es keine Änderung der Projektionsgeometrie und der Sichtweise der Insassen, da die Projektion immer direkt vor das Fahrzeug erfolgt, welche vom Gieren unberührt bleibt. Einzige Ausnahme sind weltfeste Projektionen wie das Anleuchten von Straßenschildern und Verkehrsteilnehmern wie Fußgänger und Radfahrer. Bei dieser Anwendung verändert sich der Anstrahlwinkel der Projektionspunkte, jedoch wird der genaue Projektionsort konstant durch die Kamera erfasst und relativ zum Scheinwerfer bestimmt. Dadurch ist keine weitere Anpassung der Projektion vonnöten.

Das Wanken des Fahrzeugs führt zu einem äquivalenten Wanken des Scheinwerfers. Das fahrzeugfeste KS wird somit im Bezug zum horizontierten KS um die x-Achse verdreht. Dies hat zwei Auswirkungen auf die Projektionsgeometrie: Erstens wird die Höhe der Scheinwerfer im Vergleich zur Fahrbahn verändert und zweitens ändert sich die relative Orientierung der Scheinwerfer zur Fahrbahn. Die Höhenänderung verläuft dabei gegenläufig für beide Scheinwerfer, die Verdrehung ist jedoch bei beiden identisch. Um eine zusammenhängende Beschreibung pro Scheinwerfer zu erhalten, werden die beiden Teile in nachfolgenden Untersuchungen voneinander

3. Theoretische Betrachtungen

getrennt betrachtet. Die Höhenänderung entspricht einem Huben im horizontalen KS, weshalb diese Komponente im Abschnitt zur Translation näher beleuchtet wird.

Die Verdrehung der Scheinwerfer hat eine äquivalente relative Drehung der Fahrbahn und damit der Projektionsfläche zum Fahrzeug zur Folge. Um ein Gefühl für die Auswirkungen zu erhalten, wird der Sachverhalt nun bei einer Beispielsituation betrachtet. Dabei wird ein reiner Wankwinkel im Vergleich zum Grundzustand betrachtet, ohne eine Veränderung der Scheinwerferhöhe. Maximale Wankwinkel im normalen Fahreinsatz betragen $\pm 4^\circ$.

Eine beispielhafte Anwendung ist die Projektion von ortsfesten Hilfs- und Markierungslinien aus einem einzelnen Scheinwerfer. Wird eine zur Fahrzeugfront parallele und 2,5 m breite Linie in 10 m Entfernung (Luftlinie) vom Scheinwerfer projiziert, so beträgt der Abstrahlwinkel zwischen den Randpixeln $\arctan\left(\frac{2,5\text{ m}}{10\text{ m}}\right) = 14^\circ$. In diesem Szenario steht die relative Verschiebung x der Projektionspunkte entlang der Fahrachse in Abhängigkeit zum vertikalen Abstrahlwinkels α der Projektionspixel und ihrer Höhe h über der Fahrbahn. Die Beziehung wird beschrieben durch die Gleichung 3.1.

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{10\text{ m} + x} \quad (3.1)$$

Bei einem Wankfall kann es zu einer vertikalen Verschiebung der Abstrahlwinkel der Randpixel um $\tan(4^\circ) \cdot 14^\circ \approx 1^\circ$ kommen. Unter der vereinfachten Annahme einer parallelen Fahrbahn zur ursprünglichen Scheinwerferorientierung und einer festen Höhe der einzelnen Pixelpositionen von der Fahrbahn von 60 cm ergibt sich ein ursprünglicher vertikaler Abstrahlwinkel auf den Boden von $\alpha = \arcsin\left(\frac{0,6\text{ m}}{10\text{ m}}\right) \approx 3,44^\circ$. Werden diese Werte in Gleichung 3.1 eingesetzt, so ergibt sich eine relative longitudinale Verschiebung der Projektionspunkte der Randpixel zueinander um ganze $\approx 4,08\text{ m}$. Der Zusammenhang ist in Abbildung 3.5 aus der Vogelperspektive dargestellt, wobei zur Vereinfachung der mittlere Projektionspunkt als konstant angenommen wurde. Unter Berücksichtigung dieser möglichen Verschiebungen der Darstellung ist ebenfalls eine Kompensation der Wankbewegung für eine vollständige Projektionsstabilisierung notwendig.

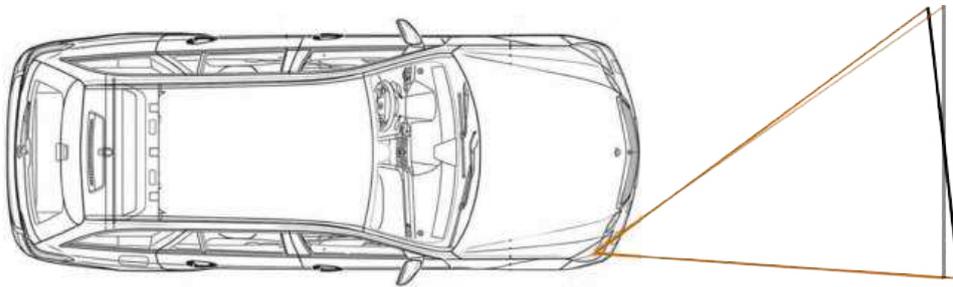


Abbildung 3.5.: Verschiebung der Projektionslinie im Wankfall von der ursprünglichen Position (grau) in die Neue (schwarz)

Äquivalent zum Wanken führt eine Nickbewegung des Fahrzeugs zu einer entsprechenden Verdrehung des fahrzeugfesten KS zum horizontalen KS um die y -Achse. Für die Scheinwerferpose sind die Folgen damit ebenfalls sehr ähnlich verglichen zum Wankfall: Es kommt zu einer relativen Höhenänderung und Verdrehung, wobei diesmal jedoch beide Bewegungen gleichläufig stattfinden. Die Höhenänderung kann ebenfalls als Hubbewegung im horizontalen KS betrachtet werden und wird deshalb getrennt betrachtet.

Ein Beispiel für auftretende Nickbewegungen ist die Fahrt über eine Geschwindigkeitsschwelle. Bei einer Schwelle von 75 mm Höhe (entspricht der Klasse verwendet bis maximal 20 km/h), führt das ohne das Dämpfungsverhalten zu einem Nickwinkel von $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{75 \text{ mm}}{\text{Radstand}}\right)$. Das ergibt bei einem Fahrzeug des Modells Smart ForTwo mit einem Radstand von 1867 mm einen resultierenden Nickwinkel von $2,3^\circ$, bei einem Mercedes Maybach der Baureihe 222 mit einem Radstand von 3365 mm einen Winkel von $1,28^\circ$.

Wie beim Wanken treten in Fahrzeugen mit modernen Fahrwerken jedoch auch deutlich höhere Nickwinkel im Bereich von bis zu $\pm 4^\circ$ auf. Betrachtet man erneut ein theoretisches Nicken des Scheinwerfers ausgehend vom Grundzustand ohne Höhenänderung, kann man eine Verschiebung der Projektion auf einer ebenen Fahrbahn herleiten. Nimmt man eine Anbauhöhe von 0,6 m, sowie eine Projektionsdistanz von 10 m an, so kann man über den einfachen trigonometrischen Zusammenhang einen Abstrahlwinkel von

3. Theoretische Betrachtungen

$$\alpha = \operatorname{atan}\left(\frac{0,6 \text{ m}}{10 \text{ m}}\right) \approx 3,4^\circ \quad (3.2)$$

bestimmen. Fügt man nun die Nickbewegung hinzu, ergibt sich die neue Projektionsdistanz zu

$$d_{\text{neu}} = \frac{0,6 \text{ m}}{\tan(3,4^\circ + x)} = \begin{cases} \infty, & \text{für } x = -4^\circ. \\ 4,6 \text{ m}, & \text{für } x = 4^\circ. \end{cases} \quad (3.3)$$

Somit liegt der jeweilige Pixel entweder nur noch in der halben Distanz zur Fahrzeugfront oder kann überhaupt nicht mehr auf den Boden projiziert werden. In Abbildung 3.6 ist der Sachverhalt noch einmal graphisch dargestellt.

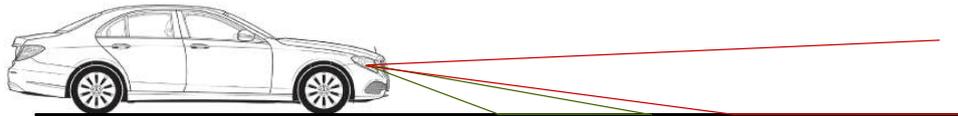


Abbildung 3.6.: Verschiebung des Projektionsbereichs bei verschiedenen Nickwinkeln des Scheinwerfers

Translation

Nach der Rotationsbetrachtung werden nun die während der Fahrt auftretenden Translationen untersucht und ihre Auswirkungen auf die Projektionsgeometrie evaluiert.

Schieben und Zucken Analysiert man zuerst das Ausscheren entlang der x- und y-Achse, also in Fahrzeuginnen- und -außenrichtung, so lassen sich diese in jeweils zwei Komponenten bei Betrachtung des Scheinwerfers aufteilen: Die erste Komponente ist eine Verschiebung der Fahrzeugmasse in Bezug zum Fahrwerk, welches eine gleiche Verschiebung der mit der Fahrzeugmasse verbundenen Scheinwerfer zur Folge hätte. Solche Bewegungen sind jedoch konstruktionsbedingt in Fahrzeugen nicht möglich, da die einzelnen

3.2. Variation der Projektionsgeometrie

aufgehängten Räder nur einen Freiheitsgrad entlang der z-Achse relativ zur Fahrzeugmasse besitzen.

Die zweite Komponente ist eine indirekte Veränderung der Scheinwerferposition, verursacht durch den aktuellen Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs im Vergleich zum Grundzustand. In Zeichnung 3.7 sind diese Zustände beispielhaft dargestellt.

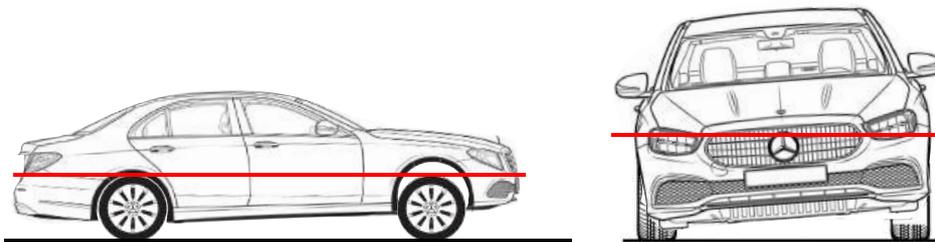


Abbildung 3.7.: Bewegungen der Scheinwerfer verursacht durch das Fahrzeug-nicken- und wanken. In rot ist die Horizontalachse im Grundzustand eingezeichnet.

Um die Auswirkungen dieser Verschiebungen zu beurteilen, werden Extremsituationen im Nick- und Wankfall evaluiert. Beim Versuchsfahrzeug aus Abschnitt 2.7 beträgt die Entfernung des Lichtmoduls in x-Richtung zum Aufstandspunkt des Vorderrads 0,6 m. Bei einem maximalen Nickwinkel von $\pm 4^\circ$ ergibt sich ein maximales Zucken von

$$d_{\max} = (1 - \cos(4^\circ)) \cdot 0,6 \text{ m} \approx 1,5 \text{ mm}. \quad (3.4)$$

Dies würde zu einer entsprechenden Verschiebung auf der Fahrbahn, mit der Annahme, dass alle weiteren Parameter konstant bleiben, von ebenfalls 1,5 mm führen. Dieser Wert ist völlig unbedeutend für die Stabilisierung und weit unter der Auflösung des Projektionssystems. So beträgt die Ausdehnung eines einzelnen Pixels auf dem Boden im Extremfall einer Projektion unter $3,5^\circ$ Abstrahlwinkel, was der äußersten Pixelreihe des aktuell weitwinkligsten Scheinwerfersystems entspricht, in 10 m Projektionsdistanz ungefähr 2 cm.

Ähnliche Ergebnisse erhält man ebenfalls für das Wanken, bei welchem der Seitenabstand der Scheinwerfer zu den Radaufstandspunkten sogar weitaus

3. Theoretische Betrachtungen

geringer ist. Im Versuchsfahrzeug beträgt dieser nur etwa 0,2 m, womit ein Schieben von 0,5 mm verursacht wird. Da sowohl für das Schieben als auch das Zucken nur sehr geringe maximale Werte im Betrieb auftreten können, welche wie aufgezeigt eine vernachlässigbare Wirkung auf die Projektionsdarstellung aufweisen, werden sie in nachfolgenden Abschnitten nicht mehr weiter betrachtet. Die Baureihe 213 besitzt einen vergleichsweise langen und breiten Frontaufbau sowie eine große Spurweite, wodurch die Scheinwerfer eine größere Translationsbewegung erfahren. Die auftretenden Maximalwerte sind deshalb meistens sogar weitaus geringer. Zusätzlich ist noch genügend Spielraum vorhanden, um selbst Bewegungen, die bis zu einem Faktor 3 größer sind, verkraften zu können. Aus diesen Gründen kann dieses Vorgehen auch in allen anderen standardmäßig aufgebauten Fahrzeugen übernommen werden.

Huben Somit verbleibt als einzige Translationskomponente das Huben des Fahrzeugs. Für die Scheinwerferprojektion spielt das Huben des Scheinwerfers im horizontalen KS die Hauptrolle. Neben dem reinen Huben des Rotationszentrums im fahrzeugfesten KS ist deshalb auch das rotationsbedingte Huben von Bedeutung für die Betrachtungen.

Beim Nicken des Fahrzeugs (verursacht durch Beschleunigungen und/oder Fahrbahnunebenheiten) ändert sich die Höhe des Scheinwerfers von der Projektionsebene. Diese Höhenänderung ist abhängig von der Art des Nickens und nicht direkt mit dem Straßenkontakt über die Räder beschrieben, da die Fahrzeugkarosserie - und somit auch die eingebauten Scheinwerfer - eine gefederte Masse darstellt, die sich dynamisch verhält. Beim Wanken verhält sich das Fahrzeug äquivalent zum Nicken, nur mit dem Unterschied, dass sich an beiden Endseiten jeweils ein Scheinwerfer befindet, sich die Seiten somit konträr auf- und abbewegen.

Technisch ist die Hubbewegung durch den Federweg der Radaufhängung begrenzt. Im Extremfall können je nach Fahrzeug- und Fahrwerksvariante theoretische Hubbewegungen von bis zu 20 cm auftreten [Ansara u. a., 2017]. In Fahrzeugen außerhalb von Off-Road-Anwendungen befinden sich diese jedoch im Bereich von ± 10 cm. Basierend auf diesen Werten sollen erneut anhand des Grundzustands die Auswirkungen auf die Projektion evaluiert werden. Über dieselbe trigonometrische Beziehung wie in 3.2.2 lässt sich

erneut die Auswirkung auf die ursprüngliche Projektionsdistanz von 10 m berechnen:

$$d_{\text{neu}} = \frac{0,6 \text{ m} + x}{\tan(3,4^\circ)} = \begin{cases} 11,67 \text{ m}, & \text{für } x = 0,1 \text{ m.} \\ 8,33 \text{ m}, & \text{für } x = -0,1 \text{ m.} \end{cases} \quad (3.5)$$

Nimmt man nun die Oberkante dazu, welche in 15 m Entfernung projiziert werden soll erhält man

$$d_{\text{neu}} = \frac{0,6 \text{ m} + x}{\tan(2,3^\circ)} = \begin{cases} 17,5 \text{ m}, & \text{für } x = 0,1 \text{ m.} \\ 12,5 \text{ m}, & \text{für } x = -0,1 \text{ m.} \end{cases} \quad (3.6)$$

Somit erhält man eine Stauchung bzw. Ausdehnung des Symbols um etwa 20 %, sowie eine damit einhergehende Verschiebung um mehrere Meter, wodurch eine Projektionsstabilisierung auch eine zuverlässige Information über die aktuelle Hubsituation benötigt. Zusammengefasst sind die für die Anpassung wichtigen Bewegungen, die während der Fahrt auftreten, rotatorisch das Nicken und Wanken sowie translatorisch das Huben. Diese drei Komponenten werden deshalb bei der folgenden Modellierung der Fahrzeugbewegungen in den Vordergrund gerückt und bilden die Grundlage der Projektionsstabilisierung.

3.2.3. Projektionsflächenvariation

In den bisherigen Betrachtungen zu Scheinwerferbewegungen wurde stets von einer ebenen Fahrbahn in der Front des Fahrzeugs ausgegangen, auf welcher das Objekt dargestellt wird. Selbstverständlich ist diese Annahme nicht realitätsgetreu - die Straßen, auf denen ein Fahrzeug unterwegs ist, weisen unterschiedliche Krümmungen und Oberflächenfehler auf, welche ebenfalls einen Einfluss auf das dargestellte Symbol besitzen.

Der Einfluss dieser Unterschiede auf die Darstellung soll im Folgenden, unterteilt in zwei Teilaspekte, aufgezeigt werden. Der erste Aspekt sind durchgängige Fahrbahnneigungen, beispielsweise bei Kuppen oder dem

3. Theoretische Betrachtungen



Abbildung 3.8.: Seitliche Ansicht der Fahrzeug- und Projektionsebenen

Graderprofil für den Abfluss von Oberflächenwasser. Diese sind keine Hindernisse oder Defekte der Fahrbahn, sondern in der Straßenanlage beim Bau integrierte Abweichungen von einer idealen Ebene. Der zweite Aspekt sind geometrisch kleinere und meist auch stärkere Abweichungen von der Ebenenbeschreibung, meistens verursacht durch bewusst oder unbewusst hinterlegte zusätzliche Objekte oder Defekte der Fahrbahn. Diese beinhalten Diskontinuitäten im Verlauf der Fahrbahn, wie Schlaglöcher, Risse und kleine Verwölbungen, sowie zusätzliche Objekte wie Geschwindigkeitsschwellen, Bordsteinkanten oder Lost Cargo.

Fahrbahnneigungen

Die Krümmung der Fahrbahn im Bereich des aktuellen Fahrzeugstandpunktes bis hin zum Ende des Symbolprojektionsbereichs spielt eine große Rolle für die Darstellung der aktuellen Projektion. Durch die Krümmung ergibt sich eine verdrehte Orientierung des Normalenvektors der Projektionsfläche sowie eine veränderte Distanz der einzelnen Pixellichtstrahlen im Vergleich zum ebenen Standardfall. Diese Komponenten führen damit zu einer entsprechenden Stauchung und Verzerrung des Lichtbilds.

Am besten lässt sich dieser Zusammenhang bei einer Zufahrt auf einen Steigungsanfang nachvollziehen. Hier wirkt die Fahrbahn vor dem Fahrzeug wie eine Art „Wand“, das Projektionssystem ist grundlegend verändert. Mathematisch betrachtet ergibt sich immer dann eine Verzerrung des Symbols, wenn der Normalenvektor der Fläche, die durch die vier Radaufstandspunkte aufgespannt wird, in eine andere Richtung zeigt als der Normalenvektor der idealisierten Projektionsfläche. Dieser Zusammenhang ist in der Seitenansicht von Figur 3.8 dargestellt.

3.2. Variation der Projektionsgeometrie

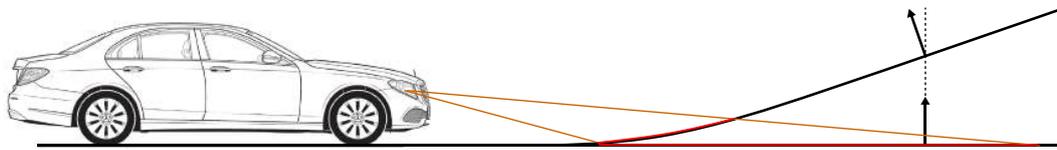


Abbildung 3.9.: Veränderung der aktiven Projektionsfläche



Abbildung 3.10.: Beschreibung der Fahrbahnkrümmung relativ zur aktuellen Fahrzeuglage

Diese Änderungen haben zur Folge, dass sich die durch den Scheinwerfer angeleuchtete Projektionsfläche stark verändert. In 3.9 sind die aktiven Projektionsflächen eingezeichnet. Deutlich zu erkennen ist die Abnahme der aktiven Projektionsfläche sowie die Zunahme der dadurch verursachten Stauchung, je stärker sich die Richtung des Normalenvektors vom Grundzustand unterscheidet.

Die Beschreibung ist dabei unabhängig davon, ob das Fahrzeug sich selbst auf einem ebenen Straßenabschnitt befindet. Von Bedeutung ist nur der Fahrbahnabschnitt vor dem Fahrzeug, welcher als Projektionsfläche dient. So kann das Fahrzeug sich beispielsweise auf dem „Knickpunkt“ des Verlaufs befinden, womit die theoretisch ideale Ebene zwar mitverdrehen wird, es aber trotzdem noch zu einer Restabweichung kommt, wie in Grafik 3.10 dargestellt.

Der Einfluss der Verdrehung der Fahrzeugmasse und damit der Bewegungen des Scheinwerfers kann deshalb von den Betrachtungen separiert werden und wurde bereits im Abschnitt der Fahrzeugbewegungen betrachtet.

Die Krümmung der Fahrbahn hat in diesem Beispiel eine Stauchung der Projektion in der Hochachse zur Folge. Über dieser longitudinalen Krümmung hinaus können sie auch transversal auftreten und müssen äquivalent behandelt werden.

3. Theoretische Betrachtungen

Diskontinuitäten

Die Straße ist keine glatte Fläche und sehr oft nicht als eine durchgängige Fläche beschreibbar, sondern weist zahlreiche Unebenheiten auf. In Abbildung 3.11 ist zum Vergleich die Abbildung einer Symbolprojektion auf die ebene Fahrbahn und einem Verwindungshügel dargestellt.

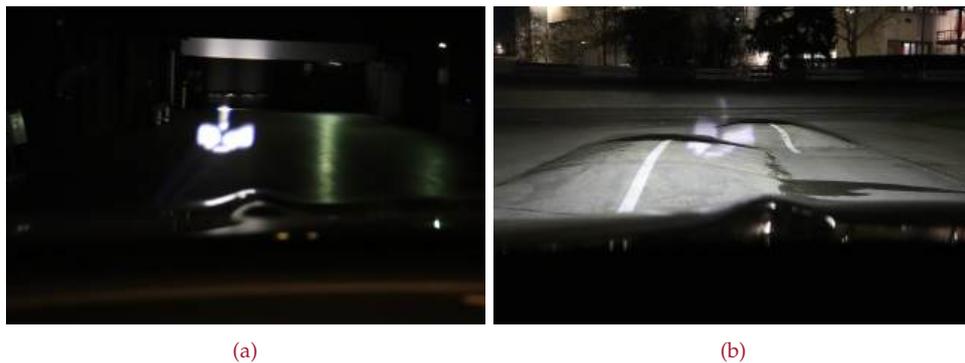


Abbildung 3.11.: (a) Projektion auf eine ebene Fahrbahn (b) Projektion auf einen Verwindungshügel

Im Vergleich zu den durch Fahrzeugbewegungen induzierten Symbolverschiebungen und Verzerrungen ist die Auswirkung auf die Erkennbarkeit der Symbole jedoch deutlich geringer für typische Diskontinuitäten wie Schlaglöcher und (Geschwindigkeits-)Schwellen.

Es zeigt sich, dass für die Symbolprojektion nur großflächige Störungen wie tiefe Bodenwellen oder Bordsteinkanten relevant sind. Andere kleinere Störungen können nicht oder nur schwer wahrgenommen werden. Als Beispiel sind in Abbildung 3.12 die Auswirkungen auf die Symboldarstellung am Beispiel einer mit zahlreichen Unebenheiten versehenen Fahrbahn dargestellt.

3.2.4. Zusammenfassung

Das zu stabilisierende Bild der Scheinwerfer ist während der Fahrt, wie in Abschnitt 3.2 dargelegt wurde, mehreren verschiedenen Einflussquellen



Abbildung 3.12.: Symbolprojektion auf eine beschädigte Fahrbahn

ausgesetzt. Diese Einzelkomponenten wiederum unterscheiden sich in ihrer Auswirkung auf die Verschiebung und Verzerrung des dargestellten Symbols. In [Abbildung 3.13](#) ist eine Übersicht der einzelnen Fehlerkomponenten und deren Wirkung auf die Projektion dargestellt.

Wie aufgezeigt wurde, ist die Projektionsdarstellung stark von der Projektionsfläche und der Scheinwerferdynamik beeinflusst. Das Stabilisationssystem benötigt damit für die Anpassung bestimmte Informationen über die aktuelle Lage des Fahrzeugs sowie der Fahrbahn vor dem Fahrzeug. Die notwendigen Teilschritte für das Gesamtsystem sehen wie folgt aus:

Fahrbahnsituation:

Die Modellierung der Fahrbahn vor dem Fahrzeug erfordert eine hochauflösende Erfassung der Fahrbahnstruktur im Projektionsbereich. Mit Hilfe dieser Informationen wird durch ein Projection Mapping das Symbol an die Fahrbahnstruktur angepasst. Um die angesprochenen Auswirkungen der Fahrbahn als Projektionsfläche auf die Symboldarstellung zu kompensieren, müssen das Höhenprofil der Fahrbahn sowie eventuell vorliegende Störungen in der Oberflächenstruktur erfasst werden.

3. Theoretische Betrachtungen

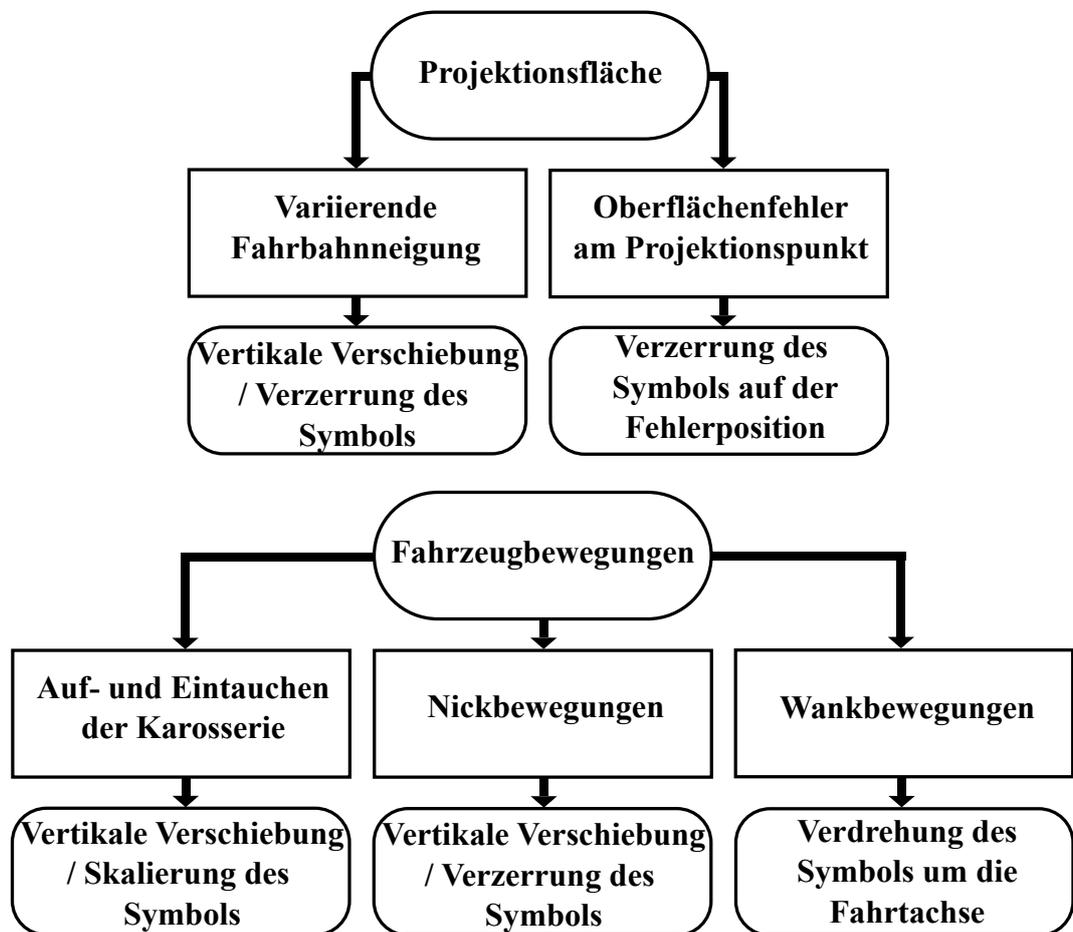


Abbildung 3.13.: Übersicht der Fehlerquellen und deren Folgen für die Projektion. Auswirkungen auf zusammengesetzte Projektionen aus zwei Scheinwerfern sind nicht beachtet.

Um die von den Scheinwerfern ausgesendete Lichtverteilung an die Fahrbahn anzupassen, sind zwei verschiedene Komponenten der Fahrbahn zu erfassen:

1. Der Verlauf und die Topographie der Fahrtstrecke vor dem Fahrzeug
2. Die Oberflächenstruktur der Fahrbahn direkt vor dem Fahrzeug

Für die Symbolprojektion ist insbesondere der zweite Punkt von herausragender Bedeutung, um bei großen Fahrbahnunebenheiten die Symbole an

die Oberflächenstruktur anzupassen.

Wie in Abschnitt 2.3.5 aufgezeigt, sind bestehende Verfahren nicht ausreichend und es wird in Kapitel 4 eine alternative Erfassungsmethode unter Verwendung der hochauflösenden Scheinwerfer und der Fahrerassistenzkamera auf Basis der aktiven Triangulation entworfen.

Prädiktion Fahrzeugdrehungen:

Damit das System nicht rein reaktiv arbeitet und um die Auswirkungen der angesprochenen Sensorlatenz auf die Stabilisierung zu minimieren, wird die Möglichkeit und Zuverlässigkeit einer Prädiktion der Fahrzeugbewegungen untersucht. Deshalb wird ein Modell aufgestellt, auf dessen Basis die Fahrzeugbewegungen in Bezug auf das Nicken und Wanken im Inertialsystem und relativ zur Fahrbahn prädiziert werden sollen. Für diese Lernaufgabe stehen durch die Drehratensensorik die realen Werte zeitverzögert zur Verfügung.

In Kapitel 5 wird das System vorgestellt.

Eigenbewegung des Fahrzeugs:

Für die Stabilisierung muss die Bewegung des Fahrzeugs relativ zur Straßenoberfläche und nicht zum inertialen Weltsystem erfasst werden. Hierfür wird in Kapitel 6 auf Basis der Arbeit in [Yargeldi, 2019] ein Berechnungsalgorithmus unter Bildung eines Fahrzeug- und Fahrwerkmodells abgeleitet.

Durch eine Kombination der nieder- und hochfrequenten Komponenten der Bewegung ist es anschließend möglich, die reinen Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs zu bestimmen. Diese Bewegungen werden durch verschiedene Sensoren im Fahrzeug erfasst und in ein für das interne Fahrzeugmodell angepasstes Signal umgewandelt, welches in die Bildstabilisierung eingespeist wird.

Anpassung der Lichtverteilung:

Auf Basis dieser Werte wird in Kapitel 7 die für eine Kompensation notwendige Anpassung der Lichtverteilung hergeleitet und in Kapitel 8 die resultierende Bildstabilisierung aufgestellt.

In Abbildung 3.14 ist die Signalflusskette des resultierenden Bildstabilisierungsaufbaus zusammengefasst aufgezeigt.

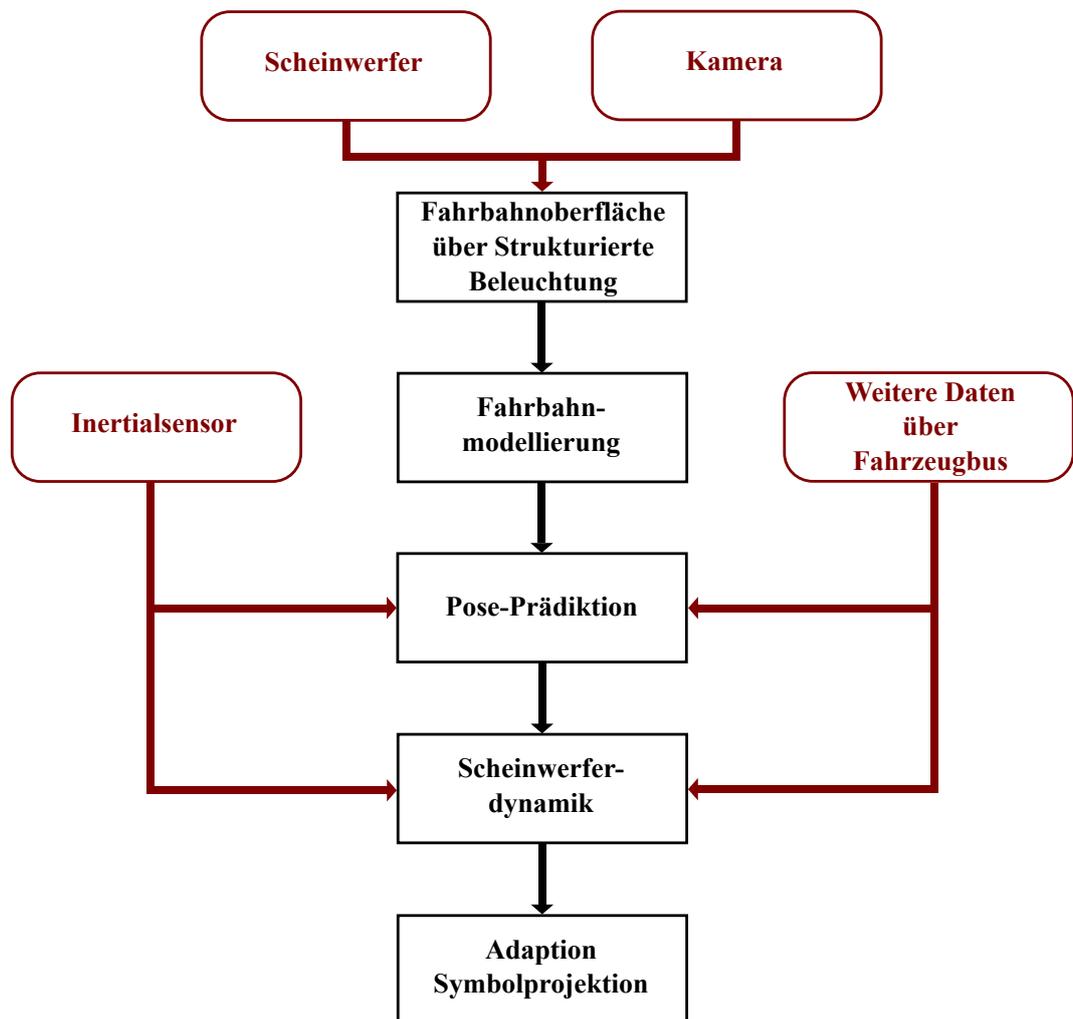


Abbildung 3.14.: Signalflusskette des gesamten Bildstabilisierungsalgorithmus

3.3. Anforderungen an die Kompensation

Nachdem nun die auftretenden Bewegungen und Verzerrungen der Symbolprojektion aufgezeigt wurden, welche während der Fahrt auftreten können, müssen hieraus Anforderungen an die gewünschte Projektionsstabilisierung abgeleitet werden.

Dazu wird im ersten Schritt die Wahrnehmung durch das menschliche Auge betrachtet. Anschließend werden die geforderten Genauigkeiten quantifiziert und die Timing-Voraussetzungen der Stabilisierung spezifiziert. Abschließend werden auf Basis dieser Betrachtungen Gütekriterien und Metriken zur Evaluation aufgestellt.

Diese soll das entworfene System zur Projektionsstabilisierung erfüllen und dienen als Entwicklungsbasis. Dabei werden Anforderungen, welche aufgrund der Rahmenbedingungen unplausibel erscheinen, bereits ausgeschlossen.

3.3.1. Menschliches Wahrnehmung

Die bedeutendste Grundlage für eine saubere Darstellung der Lichtprojektionen ist die Wahrnehmung im Auge. Die Lichtverteilungen und Symbole zur Stabilisierung sind allein für die Kommunikationen mit den Fahrzeuginsassen und anderen menschlichen Verkehrsteilnehmern konzipiert, haben also keinerlei technische Empfangsschnittstelle. Deshalb ist die Optimierung der Darstellung auf Menschen ausreichend für eine vollwertige Projektionsstabilisierung. Für den Entwurf des Systems werden daher verschiedene Aspekte der Wahrnehmung berücksichtigt, wie in Folgendem aufgezeigt.

Räumliches Auflösungsvermögen

Das räumliche Auflösungsvermögen des Auges beschreibt den minimalen Abstand, den zwei Objekte aufweisen müssen, um noch voneinander getrennte Lichtreize auslösen zu können. Über die Beugung des Lichts im

3. Theoretische Betrachtungen

Auge kann dabei recht einfach eine physikalische Grenze berechnet werden. Es gilt

$$\Delta\phi = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (3.7)$$

Dabei bezeichnet d den Pupillendurchmesser und λ die Wellenlänge des Lichts. Dadurch ist ersichtlich, dass bei Licht geringerer Wellenlänge der minimale Auflösewinkel sinkt und damit das Auflösungsvermögen steigt. Das ausgesendete Licht durch die Scheinwerfer ist mehrfarbig und enthält verschiedene Wellenlängen. Wird ein durchschnittlicher Pupillendurchmesser bei Nacht von 4 mm und 380 nm als Wellenlänge von blauem Licht des Scheinwerfers angesetzt, ergibt sich damit eine Winkelauflösung von etwa 25 Winkelsekunden. Dies entspricht etwa einem Zehntel des Winkelbereichs eines Pixels eines μ LED-Scheinwerfers von 250 Winkelsekunden.

Biologisch ist die Winkelauflösung jedoch weiterhin durch den minimalen Abstand der Sehzellen und der Auswertung im Gehirn abhängig. In Sehexperimenten zeigt sich, dass die typische wahrnehmbare Winkelauflösung bei etwa 40 bis 60 Winkelsekunden liegt, wobei 40 Winkelsekunden nur bei einer starren Betrachtung unter Projektion auf die Fovea erreicht werden. Nimmt man den Wert von 60 Winkelsekunden als Grundlage, so erkennt man, dass dies immer noch einem Viertel der μ LED-Auflösung entspricht. Somit werden selbst kleinste Verschiebungen um nur einen Pixel problemlos vom Menschen wahrgenommen.

Zeitliches Auflösungsvermögen

Das zeitliche Auflösungsvermögen des Auges beschreibt die Fähigkeit, zeitliche Änderung der Darstellung in Farb- und Helligkeitswerten voneinander unterscheiden zu können. Im gewünschten Projektionseinsatz muss zwischen zwei Fällen unterschieden werden, welche vorliegen können:

Bei Animationen und bewegten Darstellungen, wie sie bei der Fahrt mit aktiver Projektion auftreten, soll eine flüssig wirkende Darstellung erreicht werden. Dabei ist die benötigte Frequenz stark abhängig vom dargestellten Inhalt. So können Bewegungen, beispielsweise bei der Übertragung

einer Sportveranstaltung, bereits mit 30Hz flüssig dargestellt werden. Das Scheinwerfersystem bietet eine Bildwiederholrate von 60 Hz, womit für den Betrachter flüssig wirkende Verschiebungen und Anpassungen umsetzbar sind.

Ein zweiter Fall, der für das System der strukturierten Beleuchtung aus Kapitel 4 erwünscht ist, ist die Unsichtbarkeit von Darstellungsvariationen für einen menschlichen Betrachter. Bei Änderungen von Darstellungen integriert das menschliche Auge die Helligkeitswerte über die Zeit. Über eine bestimmte Bildwiederholrate kann das menschliche Auge keine Einzelbilder mehr wahrnehmen und interpretiert Bildfolgen als eine resultierende Durchschnittshelligkeit.

Aufgrund von Untersuchungen ist bekannt, dass bei den meisten Menschen die Grenze der Wahrnehmbarkeit bei Projektorsystemen bei einer Bildwiederholrate von 75 Hz liegt. [Davis, Hsieh und H.-C. Lee, 2015] Jedoch ist die tatsächliche Schwelle für jede Person unterschiedlich und zudem abhängig vom Alter, sodass von einer generellen Verschmelzung erst ab 100 Hz gesprochen werden kann. Negative körperliche Symptome wie Kopfschmerzen und Übelkeit können sogar bis 120 Hz noch auftreten, weshalb dies allgemein als benötigte Mindestfrequenz anerkannt wird.

Helligkeitswahrnehmung

Um die optische Wirkung der Symbolverschiebungen auf die Verkehrsteilnehmer zu verringern, soll in den Abschnitten, in denen die Stabilisierung eine zu hohe Latenz aufweist oder am Ende seines Regelbereichs ist, eine Helligkeitsanpassung erfolgen. Dies hat den Hintergrund, dass die Projektionen, wie in Abschnitt 3.2.1 dargestellt, abhängig von der Projektionsentfernung unterschiedlich stark von den Insassen wahrgenommen werden. Der mathematische Zusammenhang wird beschrieben durch das photometrische Entfernungsgesetz, welches die Beleuchtungsstärke E_p eines Punktes im Raum in Abhängigkeit der Lichtstärke I_ε der Quelle, der Entfernung r der Beleuchtungsfläche und des Einfallswinkels ε beschreibt:

$$E_p = \frac{I_\varepsilon}{r^2} \cos(\varepsilon) \quad (3.8)$$

3. Theoretische Betrachtungen

Durch das photometrische Entfernungsgesetz verändert sich auch die visuelle Helligkeit der Symbolik. Je nach Position (verändertes Reflexionsverhalten) und Entfernung muss deshalb die Helligkeit des Symbols angepasst werden, selbst wenn eine vollständige Positionskorrektur erreicht wird.

3.3.2. Genauigkeit

Für eine Stabilisierung der Symbole muss die Änderung der Situation schnell genug erfasst und durch das ausgestrahlte Lichtbild kompensiert werden. Hierbei gibt es durch die Dynamikkompensation und die Anpassung der Darstellung an die Fahrbahnstruktur zwei verschiedene Komponenten, die getrennt voneinander betrachtet werden müssen.

Dynamikkompensation

Als Beispielszenario wird die Fahrt über eine Schwelle betrachtet, da hier sehr schnelle und äußerst große Nickbewegungen des Fahrzeugs auftreten, in Verbindung mit einer gleichzeitigen Höhenänderung des Scheinwerfers über der Fahrbahnebene. Dies ist herausfordernd, da der Abstrahlwinkel bei einer Symbolprojektion in etwa 20m Entfernung (ungefährer maximaler Abstand der Symbolpunkte) vom Fahrzeug in Ruheposition (Scheinwerferhöhe $h_{Ruhe} = 0,6\text{ m}$) nur $\alpha = \tan^{-1}(0,6/20) = \tan^{-1}(0.03) \approx 1,7^\circ$ beträgt. Wie im Abschnitt zuvor behandelt, kann alleine der Stillstand auf der Schwelle mit dem Vorderrad zu einem größeren Nicken führen, wodurch das Symbol komplett von der Fahrbahn verschwindet, wenn die Fahrwerksdynamik ignoriert wird.

Während der Auffahrt muss deshalb in die Projektion eingegriffen werden, bevor eine signifikante Verschiebung erfolgt. Als Grenzwert wird hierzu die maximale prozentuale Verschiebung der Entfernung festgelegt, bevor eine Regelung erfolgen muss. Dies wird für die erste Betrachtung auf 5 % gesetzt. Damit kann der Aufnickvorgang bei einer ursprünglichen Projektionsentfernung o für die Nickwinkeländerung $\Delta\alpha$ zum Ursprungswinkel

α_{t-1} beschrieben werden mit

$$\alpha_{t-1} - \Delta\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{h_{\text{Ruhe}} - p(x + 1,05 \cdot o) + \tan(\Delta\alpha) \cdot (\text{Radstand} + s_{\text{FS}})}{1,05 \cdot o}\right). \quad (3.9)$$

Dabei entspricht s_{FS} dem Längsabstand des Scheinwerfers von der Frontachse, x der x-Position des Projektionspunkts im Weltkoordinatensystem relativ zur Scheinwerferprojektion und p der Höhe relativ zur Fahrzeugebene.

Bei einer Fahrbahnschwelle auf der Ebene vereinfacht sich das Ganze zu

$$\alpha_{t-1} - \Delta\alpha(x) = \tan^{-1}\left(\frac{h_{\text{Ruhe}} + \tan(\Delta\alpha) \cdot (\text{Radstand} + s_{\text{FS}})}{1,05 \cdot o}\right) \quad (3.10)$$

Bei einer Symbolentfernung von 20 m muss beim genutzten Versuchsträger somit ab einer Nickwinkeländerung von $\Delta\alpha = 0,07^\circ$ reagiert werden.

Alternativ lässt sich modellbasiert ein Zielszenario festlegen. Wird die einfache Nickbewegung des Fahrzeugs betrachtet, so lässt sich ein Nickwinkel definieren, dessen Einfluss auf die Symbolbewegung noch zu tolerieren ist. Wird als erster Ansatz eine maximale Positionsänderung des Symbols von 5 % erlaubt, also 75 cm auf der Fahrbahn bei der größten Symbolentfernung von 15 m, so muss ab einer Nickwinkeländerung von $0,09^\circ$ eingegriffen werden.

Dieser Wert kann ebenfalls für die Wankwinkel erfassung übernommen werden, da dort die auftretenden Störungen und deren Einflüsse auf die Projektionsdarstellung geringer sind.

Bei den Hubbewegungen werden die Betrachtungen aus Abschnitt 3.2.2 mit 15 m Projektionsweite als Ausgangspunkt verwendet. Die Auswirkung der Hubbewegung auf die Projektionsweite beträgt 25 cm pro cm Huben. Erneut wird die erlaubte Verschiebung auf 5 %, dementsprechend 0,75 m festgelegt. Damit muss die Hubbewegung des Fahrzeugs auf 3 cm genau bestimmt werden.

3. Theoretische Betrachtungen

Fahrbahnanpassung

Für die Fahrbahnanpassung wird wie in Abschnitt 3.2 aufgezeigt die Tiefeninformation benötigt. Die erforderliche Genauigkeit ist dabei jedoch abhängig von der Art der Projektion und der Störung, da die Sichtbarkeit unterschiedlich beeinflusst wird. Die einfachste Art einer allgemeingültigen Beschreibung ist dabei die Betrachtung eines Lichtstrahls eines Scheinwerferpixels. Wird der Weg bis zum Auftreffen auf ein Objekt im Vergleich zu einer ebenen Fahrbahn verkürzt oder verlängert, führt dies zu einer proportionalen Verzerrung. Dies gilt ebenso für die Darstellung nach der Projektionsstabilisierung, falls die Fahrbahnrekonstruktion fehlerbehaftet ist.

In einem Projektionsbereich zwischen 12 und 18 m Projektionsweite mittig zur Scheinwerferachse, kann die Anbauhöhe vernachlässigt werden und die Lichtstrahlen variieren ebenfalls zwischen einer Länge von 12 und 18 m. Setzt man in diesem Bereich von 6 m eine maximale Verzerrung von 1 % an, so darf die angenommene Strahllänge um höchstens 6 cm variieren.

Diese lässt sich in eine äquivalente erforderliche Rekonstruktionsgenauigkeit überführen, welche jedoch aufgrund des flachen Abstrahlwinkels auf 5 cm herabgesetzt wird. Ebenso wird eine entsprechende Dichte der Rekonstruktionspunkte benötigt - zwei benachbarte Punkte dürfen in den Achsen des horizontalen KS nicht mehr als jeweils 5 cm auseinander liegen, solange keine Verdeckung vorliegt.

3.3.3. Timing

Nachdem die Fahrbahn vor dem Fahrzeug und die Fahrzeugbewegungen erfasst und die neue Lichtverteilung berechnet wurde, muss diese an das entsprechende Steuergerät übertragen und projiziert werden. Diese Berechnungen, Übertragungswege und Projektionsvorgänge sind jedoch mit Latenzen behaftet, währenddessen sich die Scheinwerferlage und Straßensituation weiter verändern.

Dadurch kommt es zu Fehlern in der Kompensation, proportional abhängig vom Latenzwert bei linearen Veränderungen. Wichtig ist die Betrachtung

3.3. Anforderungen an die Kompensation

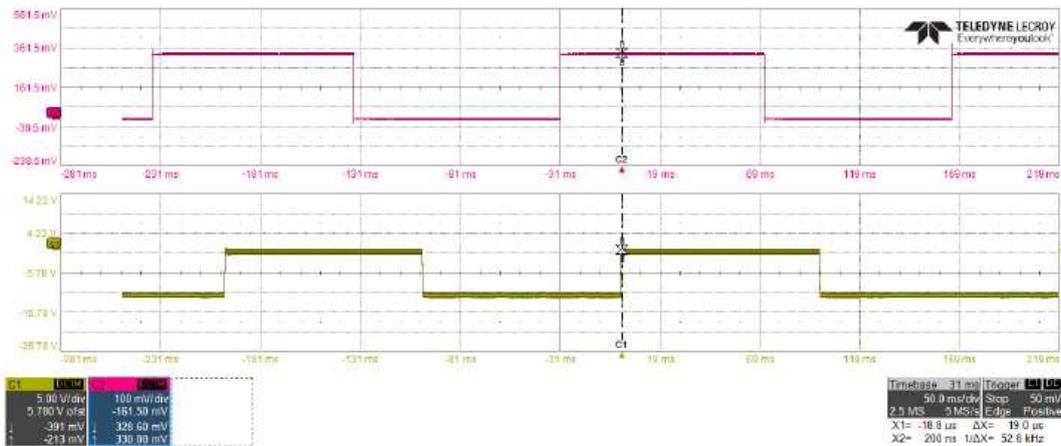


Abbildung 3.15.: Einschaltzeitraum der hochauflösenden Matrix (gelb) im Vergleich zum Einschaltsignal (rosa)

der nötigen Geschwindigkeit des Systems, um eine zufriedenstellende Stabilisierung zu gewährleisten.

Im Oszilloskop-Screenshot 3.15 ist die Reaktionszeit des Fahrzeugsystems des Versuchsträgers auf eine Änderung der Lichtverteilung dargestellt. Es ist eine durchschnittliche Verzögerung von 30 ms bei einer Abweichung von $\approx \pm 10$ ms zu erkennen.

Auf Basis dieser Latenz wird nun betrachtet, welche Veränderungen die jeweiligen Verschiebungen und Verzerrungen in vergleichbaren Zeitabschnitten verursachen.

In Abschnitt 3.3.2 wurde betrachtet, ab welchen Winkeländerungen der Fahrzeuglage in die Projektion eingegriffen werden muss. Ist der zeitliche Winkelverlauf für die hochdynamischen Fahrtbewegungen bekannt, lässt sich bestimmen, wie viel Zeit bis zu einem Eingreifzeitpunkt verbleibt.

Bei einer Testfahrt im Versuchsträger über eine Geschwindigkeitsschwelle wurde beim Abfahren eine Nickbewegung um 2° innerhalb von 200 ms herbeigeführt. Somit muss das System bereits $\frac{200 \text{ ms} \cdot 0.1^\circ}{2^\circ} = 10$ ms nach Beginn der Anregung mit der Entgegensteuerung zur Symbolbewegung beginnen. Das ist mit der aufgezeigten Latenz im Fahrzeugaufbau nicht zu erreichen,

3. Theoretische Betrachtungen

weshalb der Nickwinkel des Fahrzeugs bereits im Voraus prädiziert werden muss, wenn eine angenehme Stabilisierung erfolgen soll.

Hiernach muss weiterhin sichergestellt werden, dass die Gegensteuerung schneller als die weitere Veränderung reagiert.

3.3.4. Gütekriterien und Metriken

Nachdem die Timing- und Genauigkeitsvoraussetzungen betrachtet wurden, lassen sich hieraus Gütekriterien und Metriken ableiten, welche die in Abschnitt 3.2.4 definierten Teilsysteme erfüllen müssen.

- **Fahrbahnrekonstruktion:** Sie unterliegt zwei Hauptaspekten, welche erfüllt werden müssen. Diese ist zum einen die Genauigkeit, welche für eine Projektionsanpassung erreicht werden muss. Diese beträgt wie in 3.3.2 aufgezeigt ± 5 cm. Zum Zweiten ist es die zeitliche Latenz und die Messentfernung. Eine Festlegung ist hier aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit nicht möglich, die Stabilisierung benötigt zu Beginn der Berechnungen die Fahrbahninformation in 18 m Entfernung.
- **Pose-Prädiktion:** Das entworfene System zur Prädiktion muss die Latenzprobleme aus Abschnitt 3.3.3 kompensieren. Da die Latenzen des Projektionssystems 30 bis 40 ms betragen können und die Periodendauer der Sensorsignale 10 ms entspricht, wird eine Prädiktion von mindestens 40 ms in die Zukunft anvisiert. Weiterhin darf der Fehler wie in Abschnitt 3.3.2 aufgezeigt $0,1^\circ$ pro Achse nicht übersteigen.
- **Erfassung Scheinwerferdynamik:** Die Erfassung der Scheinwerferdynamik basiert auf einer Modellierung der Fahrzeugbewegungen, wobei die Pose-Prädiktion als Teilkomponente integriert wird. Das Ergebnis wird als Grundlage der Projektionsstabilisierung verwendet und darf deshalb bei den Drehraten ebenfalls wie in 3.3.2 aufgezeigt $0,1^\circ$ pro Achse nicht übersteigen. Bei der Hubbestimmung gilt dementsprechend eine Zielgenauigkeit von 3 cm.
- **Bildverarbeitung:** Für die Bildverarbeitung lassen sich keine festen Metriken aufstellen, sondern nur Gütekriterien nach der menschlichen Wahrnehmung aus Abschnitt 3.3.1 definieren. Eines hiervon ist die Forderung der Anwendbarkeit auf 60 Hz, um die Möglichkeiten des

μ LED-Systems auszureizen und eine flüssig wirkende Darstellung zu erhalten. Weiterhin dürfen bei der Anpassung der Lichtverteilung keine störenden Artefakte oder sichtbaren Pixelsprünge entstehen.

- **Projektionsstabilisierung:** Um neben den geforderten Werten der Dynamikbestimmung und Fahrbahnbestimmung eine direkte Auswertung der Qualität der Projektionsstabilisierung vornehmen zu können, werden zusätzliche Gütekriterien definiert. Diese werden anhand eines Vergleichs der stabilisierten und ungestabilisierten Projektion bei klar definierten Fahrmanövern und -situationen definiert. Da hier kein Ground Truth existiert, werden Kameraaufnahmen verwendet, welche je nach Situation anhand von Umgebungsmerkmalen stabilisiert sind. Damit ist eine Evaluation der Stabilisierungsperformance anhand der Verschiebung der Projektionen möglich.

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

Um eine Anpassung der Projektion an die Oberflächenbeschaffenheit der Fahrbahn zu gewährleisten, muss eine genaue Erfassung der Fahrbahntiefen erfolgen. Die Positionierung dieser Fahrbahnerfassung in der Gesamtsystemgrafik aus dem Einleitungskapitel ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

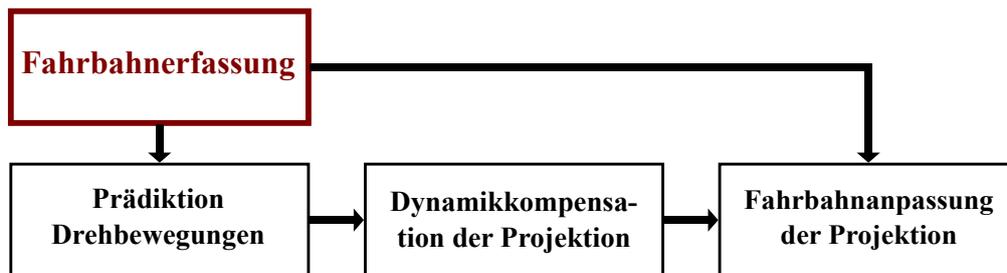


Abbildung 4.1.: Position der Fahrbahnerfassung (rot) im Gesamtsystem

Wie bereits im Stand der Technik aufgezeigt, ist hier die Erkennung per Kamera durch verschiedene Verfahren wie Stereo Matching und Shape-from-X möglich. Diese erreichen jedoch unter unzureichenden Lichtverhältnissen nicht die gewünschte Genauigkeit und Robustheit, weshalb eine Fahrbahnrekonstruktion mithilfe des Scheinwerfers unter Ausnutzung der aktiven Triangulation aufgebaut wird.

Das entworfene System für den Einsatz im Fahrzeug soll nun in Kürze vorgestellt werden. Dabei wird zuerst auf die theoretischen Grundlagen eingegangen, um die Funktionsweise zu erläutern. Anschließend werden die durchgeführten Überlegungen und Untersuchungen während des Entwicklungsvorgangs aufgezeigt, um Herausforderungen und Schwierigkeiten

bei der Adaption in das automobiler Umfeld darzulegen. Zum Schluss erfolgt eine ausführliche Einführung in die Funktionsweise und Algorithmik des umgesetzten Systems zur aktiven Triangulation und eine Einordnung und Auswertung der erzielten Ergebnisse anhand von Testmessungen. Der Abschnitt über das ausgewählte Verfahren enthält dabei viele Inhalte der betreuten Masterarbeit [Wehle, 2022].

4.1. Theorie

Als aktiver Vertreter bedient sich das Strukturierte Licht (SL) in der Berechnung der Entfernung wie alle Stereo Vision Verfahren dem Triangulationsprinzip. Die Triangulation ist ein weit verbreitetes Verfahren zur Abstandsmessung, bei dem die Lokation eines Zielpunkts über die Erfassung von zwei Messpunkten aus, deren relative Position zueinander bekannt ist, berechnet wird. Die optische Triangulation ist ein Messverfahren für die berührungslose 3D-Vermessung von Objekten und Szenen und verwendet dabei korrespondierende Punkte zwischen einer Kamera und mindestens einer weiteren Kamera und/oder eines Projektors. Korrespondierende Punkte bezeichnen dabei den jeweiligen Abbildungspixel der Kamera oder des Projektors von demselben beziehungsweise auf denselben Punkt im dreidimensionalen Raum. Damit kann mithilfe der bekannten Abbildungseigenschaften die Position des entsprechenden Punktes im Raum berechnet werden. Als Beispiel soll hier die einfache Triangulation anhand einer Punktkorrespondenz zwischen zwei Kameras und einer Punktlichtquelle mit bekannten Eigenschaften aufgezeigt werden:

Ziel ist es, die dreidimensionale Position des Zielobjekts $P = (X, Y, Z)$ im Vergleich zur Kameraposition zu bestimmen. Dabei wird das Weltkoordinatensystem der Kamerahauptachse entsprechend ausgerichtet. Die Lichtquelle ist mit dem Basisabstand (x_B, y_B, z_B) zum Kameraursprung positioniert und besitzt eine Verdrehung α auf der x-z-Ebene. Wird der Lichtpunkt der Quelle auf dem Zielobjekt im Kamerapixel (x, y) detektiert, so lässt sich die dreidimensionale Position im Raum berechnen zu:

$$X = \frac{\tan(\alpha) \cdot X_B + z_B}{\frac{f}{x} + \tan(\alpha)} = x \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot x_B + z_B}{f + x \cdot \tan(\alpha)} \quad (4.1)$$

und

$$Y = y \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot x_B + z_B}{f + x \cdot \tan(\alpha)} + y_B; \quad Z = f \cdot \frac{\tan(\alpha) \cdot x_B + z_B}{f + x \cdot \tan(\alpha)} \quad (4.2)$$

Unter geeigneten Bedingungen sind so im Vergleich zu anderen automobilen Sensoren wie LiDAR oder ToF weit höhere Genauigkeiten erreichbar. Nach [Lambert u. a., 2020] besitzen gängige LiDAR-Sensoren im relevanten Messbereich einen Standardfehler von etwa 4 cm und ToF-Sensoren eine Entfernungs-Abweichung von 2-3%, wie beispielsweise der ST VL53LoX [*Time-of-Flight ranging sensor* 2022]. Im Gegensatz hierzu sind mit gängigen Verfahren der Tiefenerfassung über Strukturiertes Licht Genauigkeiten im Submillimeter-Bereich üblich [Eiríksson u. a., 2016].

Die aktive Triangulation kann hierbei als eine einfache Abwandlung des aufgezeigten passiven Systems angesehen werden, bei der eine der Kameras durch eine Lichtquelle ersetzt wird, dessen Leuchteigenschaften bekannt sind. Sie ist eine bereits etablierte Technik, die in vielen Bereichen Anwendung findet und experimentell bereits in den 60er Jahren [Gilmore, Ramsey und Fahy, 1962] auf einen Einsatz in Fahrzeugen hin untersucht wurde. So wird sie breit in der Robotik und Automation verwendet, ebenso wie in der Medizintechnik als non-invasive und kontaktlose Messmethode. Dabei kann selbst mit einfacher und günstiger Hardware eine relativ hohe Genauigkeit erreicht werden, wie in [Bouguet und Perona, 1998] dargestellt, wo mit einem einfachen Stift und einer Tischlampe bereits Genauigkeiten von unter einem Millimeter erreicht werden können.

In der Literatur sind eine Vielzahl von Anwendungen der Strukturierten Beleuchtung zur Triangulation zu finden, die auf Projektionen durch handelsübliche Beamer basieren. Diese verwenden ebenfalls die DLP-Technologie, wie sie in DMD-Scheinwerfern Einsatz findet. Durch die steigende Auflösung der Fahrzeugscheinwerfer bestehen nun auch im Auto immer bessere Möglichkeiten für einen eventuellen Einsatz des Verfahrens, indem

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

nur auf bereits verbaute Kamerasysteme und Ansteuerungsmöglichkeiten zurückgegriffen wird.

Diese Systeme sind dabei fast immer für einen Einsatz unter kontrollierten Bedingungen ausgelegt, die im Straßenverkehr nicht gewährleistet werden können. Jedoch entwirft Christian Schneider in seiner Dissertation [Schneider, 2019] ein System zur Entfernungsbestimmung, basierend auf einem 84-Pixel Modul. Dieses ist zwar beschränkt auf eine einfache Distanzmessung zu einer ebenen Wand, zeigt jedoch die Verwendbarkeit des Fahrzeugscheinwerfers unter Realbedingungen als Triangulationswerkzeug. Auf diese Weise kann für verschiedene Anwendungen wie das autonome Fahren ein zusätzliches Erfassungssystem für die notwendige Redundanz integriert werden, ohne zusätzliche Bauteile und damit Bauraum und Kosten zu verursachen.

Der bedeutendste Vorteil der aktiven Triangulation für die geplante Anwendung ist jedoch die Funktionsfähigkeit in schlecht oder nicht beleuchteten Szenarien, weshalb sie sich gut für den Einsatz in der Projektionsstabilisierung im Fahrzeug bei geringer beziehungsweise fehlender Außenbeleuchtung eignet. Im Gegenzug werden jedoch eine genaue Vermessung und Kalibrierung der beteiligten Komponenten, also der Kamera sowie der Lichtquelle, benötigt.

Das Ziel ist es nun, ein hochauflösendes Vermessungssystem auf Basis der Strukturierten Beleuchtung im Fahrzeug zu implementieren, welches unabhängig von der Geometrie des Anstrahlbereichs funktioniert.

4.2. Strukturiertes Licht im Fahrzeugeinsatz

Um ein geeignetes System als Grundlage für die Stabilisierungsaufgabe entwerfen zu können, müssen eine Vielzahl an verschiedenen Faktoren beachtet werden. In diesem Abschnitt sollen deshalb die einzelnen Voraussetzungen aufgezeigt und diskutiert werden, welche für die Auswahl des konkreten Systems von Bedeutung sind.

Obwohl die im Fahrzeug existente Hardware dieselbe ist wie die in bereits im Einsatz befindlichen 3D-Scannern auf SL-Basis, gibt es besondere

Herausforderungen im Anwendungsfall, welche die Konzeption einer eigenen Lösung notwendig machen. Diese Punkte sollen nun nacheinander diskutiert werden.

4.2.1. Geometrie des Aufbaus

Im größten Teil der Symboldarstellung ist die beleuchtete Fläche und damit die Fläche, auf die das Lichtmuster projiziert wird, auf einen Bereich bis etwa 15m von der Fahrzeugfront begrenzt und umfasst Projektionen in der eigenen Fahrspur. Für einige Anwendungsszenarien kann dies jedoch auf eine benachbarte Fahrspur ausgeweitet werden, beispielsweise bei Lichtteppichprojektionen als Führungshilfe. Innerhalb dieser Bereiche muss das System der strukturierten Beleuchtung Informationen über die Beschaffenheit der Projektionsfläche liefern und rechtzeitig zur Verfügung stellen, um eine rechtzeitige Neuberechnung der Projektion zu ermöglichen.

Ausgehend von der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Verarbeitungszeit muss aus diesen Gründen das System über den Projektionsbereich hinaus entlang der Fahrtrichtung Informationen über die Fahrbahn liefern. Da die überwiegende Mehrzahl der Projektionen in einem Geschwindigkeitsbereich von $< 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ stattfindet, wird bei einer Gesamtverarbeitungszeit von 100 ms analog zu Abschnitt 3.3.4 eine Rekonstruktion bis in 18 m Entfernung benötigt. Um einen zusätzlichen Puffer zu erhalten, wird deshalb die Zielweite auf 20 m festgelegt.

Bei diesen Entfernungen ergeben sich jedoch sehr geringe Abstrahlwinkel der Scheinwerfer und damit eine größere Flächenausdehnung pro Scheinwerferpixel. Aus diesem Grund werden die Genauigkeitsanforderungen aus Abschnitt 3.3.4 angepasst und in eine entfernungsabhängige Beschreibung überführt. Aus diesem Grund soll die Genauigkeitsanforderung von ± 5 cm auf eine Entfernung von 18 m gesetzt und um diese Entfernung herum linear skaliert. Somit ergibt sich im maximalen Erfassungsbereich zwischen 10 und 20 m eine Anforderung von $\pm 2,5$ cm bei 10 m und $\pm 5,5$ cm bei 20 m Entfernung.

4.2.2. Störquellen

Im Gegensatz zu den kontrollierten Bedingungen, die im Einsatz der meisten etablierten SL-Anwendungen vorherrschen, ist das System im Fahrzeug verschiedensten Störquellen und variablen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Dies betrifft sowohl Eigenschaften der Projektionsfläche als auch Auswirkungen Fremdlichtquellen.

Unterschiedliche Oberflächen

Diese auf den ersten Blick einfachen Störungen sind für den Algorithmus, welcher die Kameradaten auswertet, um das Lichtmuster zu extrahieren, eine riesige Herausforderung. Je nach Fahrbahn ändert sich der aufgenommene Grauwert teilweise enorm, weshalb statische Schwellwerte zur Auswertung nicht in Frage kommen.

In Bild 4.2 sind die Projektionen eines Schachbrettmusters auf eine Fahrbahn zu sehen. Im feuchten und nassen Bereich der Fahrbahn ändern sich die Reflexionseigenschaften des Belags signifikant, sodass die Kanten des Musters nicht mehr oder nur sehr schwer wahrgenommen werden können.

Umgebungslicht

Ein im Resultat sehr ähnliches Problem ist die Störung mit Umgebungslicht, was für einen geringeren Kontrast der einzelnen Abschnitte des Projektionsmusters zum Hintergrund sorgt und somit eine Erkennung durch die Kamera signifikant erschwert. Vor allem die Erkennung unterschiedlicher Intensitätsstufen, die oft für eine Kodierung verwendet werden, gestaltet sich somit als stark abhängig von den Umgebungsbedingungen.



Abbildung 4.2.: Projektion auf nasser Fahrbahn

4.2.3. Unsichtbarkeit

Eine große Herausforderung für einen realistischen Einsatz des Systems in Serienfahrzeugen ist die Sichtbarkeit der verwendeten Projektion im Betrieb während des Messvorgangs. Im Vergleich zu den meisten anderen Anwendungsgebieten des strukturierten Lichts darf das ausgestrahlte Lichtmuster für die Fahrzeuginsassen und übrigen Verkehrsteilnehmer nicht sichtbar sein.

Die Gesamtheit dieser für den menschlichen Betrachter nicht wahrnehmbaren Methoden ist in der Literatur als Imperceptible Structured Light bekannt [Fofi]. Anwendungen des Strukturierten Lichts im Consumer-Bereich wie beispielsweise FaceID beim Apple iPhone oder die erste Version des Microsoft Kinect, greifen deshalb auf nicht sichtbare Wellenlängen im Infrarotbereich zurück. Im Scheinwerfer, aus welchem nur sichtbares Licht ausgestrahlt wird, kann dieser Ansatz jedoch nicht gewählt werden, da somit ein zusätzliches Lichtmodul allein für das Strukturierte Licht notwendig wäre. Es muss deshalb ein Verfahren entwickelt werden, durch welches das Muster für die Kamera erfassbar ist, aber durch Menschen nicht

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

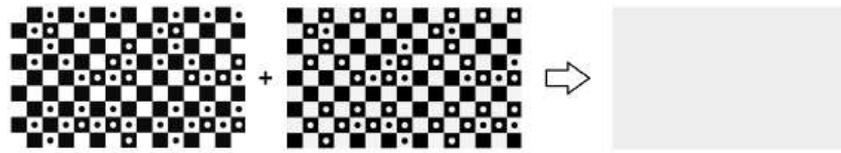


Abbildung 4.3.: Fusion eines Musters mit seinem Komplement

wahrgenommen werden kann. Zusätzlich darf die Darstellung einer parallel stattfindenden Symbolprojektion, beispielsweise vom Baustellensymbol, hiervon nicht beeinflusst werden.

Zur Lösung des Problems wurden zwei verschiedene Verfahren untersucht, welche hier vorgestellt werden.

Flicker Fusion

Der erste mögliche Ansatz ist die sogenannte Flicker Fusion. Durch die Eigenschaften des menschlichen Auges, Lichtverteilungen über die Zeit zu integrieren, ist es möglich, Muster unbemerkt in eine stetige Lichtverteilung einzubinden.

Hierbei wird nach dem Ausstrahlen des Lichtmusters im nächsten Frame das komplementäre Muster ausgestrahlt. Durch die Integration des menschlichen Auges ergibt sich so insgesamt eine „weiße“ Fläche. Der Sachverhalt ist in Abbildung 4.3 anhand eines Beispielmusters dargestellt.

Diese Wahrnehmung kann durch die Einblendung von „weißen“ Zwischenframes noch weiter verstärkt werden.

Wie in Abschnitt 3.3.1 aufgezeigt wurde, beträgt die Mindestfrequenz für nicht wahrnehmbare Bildwechsel bei 120 Hz. Somit muss das verbaute Scheinwerfersystem eine entsprechende Mindestbildwiederholrate für eine Umsetzung bieten. Aktuelle Systeme, wie beispielsweise im verwendeten Versuchsträger verbaut, bieten lediglich eine Bildfrequenz von 60 Hz. Technisch befinden sich jedoch Erweiterungen auf bereits 100 und 120 Hz in Diskussion, mit welchen eine Umsetzung der Flicker Fusion möglich sein wird.

PWM-Einbettung

Im Vergleich zum DMD-System ermöglichen μ LED Scheinwerfer durch die interne PWM-Steuerung der Helligkeit der Einzel-LEDs eine weitere Möglichkeit, verschiedene Lichtmuster unsichtbar in das Lichtbild einzubauen.

So kann nach [Fiege u. a., 2015] in die PWM-Steuerungsfolge der aktuellen Pixelhelligkeit das Muster entsprechend eingebettet werden, sodass zum Aufnahmezeitpunkt des Kamerabildes die entsprechenden Pixel im PWM-High bzw. PWM-Low Zustand sind.

Der Sachverhalt ist in Abbildung 4.4 am Beispiel von 2 Einzel-LEDs dargestellt. LED 1 ist hier für die Darstellung eines Pixels niedriger Helligkeit im normalen Lichtbild verantwortlich, LED 2 für die Darstellung eines Pixels voller Helligkeit.

Zum Darstellungszeitpunkt des Lichtmusters für die strukturierte Beleuchtung müssen nun im Zeitabschnitt A Pixel 1 und damit LED 1 hell und Pixel 2 bzw. LED 2 dunkel geschaltet werden. Für LED 1 ist dies durch eine entsprechende anteilmäßige Verschiebung der zeitlichen PWM-High Phasen zu erreichen.

Bei LED 2 kann diese Verschiebung nicht erfolgen, da eine volle Helligkeit vorliegt, also keine PWM-Low Phasen vorhanden sind. In [Schneider, 2019] wurde jedoch durch Probandenstudien herausgefunden, dass eine PWM-Rate von bis zu 95 % im Automobilscheinwerfer nicht von einer vollen Helligkeit unterschieden werden kann.

Ist die gegenteilige Konstellation der Fall, liegen also keine PWM-High Phasen vor, bei einem gewünschten Ein-Zustand des entsprechenden Pixels im Lichtmuster, so muss eine Mindesthelligkeit für alle Pixel in allen Lichtbildern definiert werden, um keine Helligkeitsunterschiede zu verursachen.

Hierdurch muss als Folge in Kauf genommen werden, mit keinem Pixel eine Null-Helligkeit darstellen zu können, da immer ein PWM-High Zustand bestimmter Länge für die Muster-Implementation vorliegen muss. Außerdem ist die notwendige Algorithmik zur Ansteuerung der Einzelpixel komplexer

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

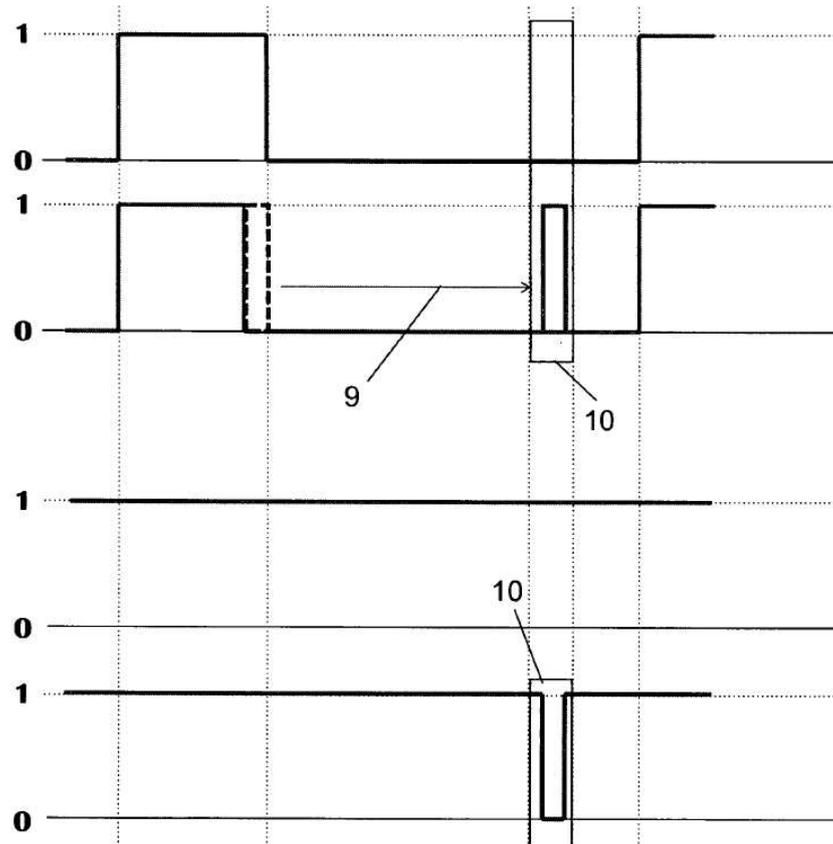


Abbildung 4.4.: Einbettung des Musters in die PW-Modulation der Pixelhelligkeiten [Fiege u. a., 2015]

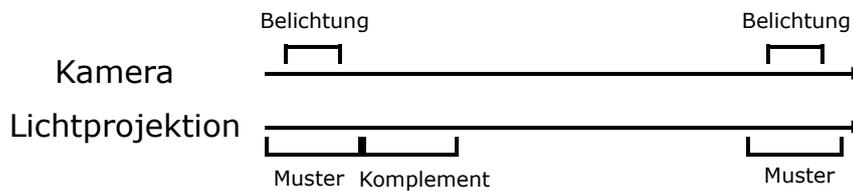


Abbildung 4.5.: Zeitverlauf für die Belichtung der Kamera und der Musterprojektion

als im Fall der Flicker Fusion, ebenso wie die Kameraansteuerung aufgrund der hohen PWM-Frequenz und damit kürzeren Projektionszeiten des Musters. Dennoch ist die PWM-Einbettung das präferierte System, da eine Integration in bestehende Scheinwerferarchitekturen möglich ist, mit einer sichergestellten Unsichtbarkeit für menschliche Betrachter.

4.2.4. Hardwarekontrolle/Synchronisation

Um ein sauber arbeitendes Gesamtsystem zu erhalten, ist es von großer Bedeutung, das Gesamtsystem aus dem Scheinwerfer mitsamt Bildgenerierung sowie der aufnehmenden Kamera unter Kontrolle zu haben. Die im Fahrzeug befindliche Kamera muss Bilder vom Projektionsbereich exakt zu den Zeitpunkten aufnehmen, in denen das Muster sichtbar ist, um eine Auswertung des Lichtmusters vornehmen zu können.

Die Fahrerassistentenkamera und die Scheinwerfer stellen im Fahrzeug jedoch zwei unabhängige Systeme dar, die keine physische Kopplung besitzen. Eine Synchronisierung der beiden Systeme ist aber für ein System des Strukturierten Lichts unabdingbar, da das Bild exakt zum Zeitpunkt der Darstellung des Lichtmusters aufgenommen werden muss.

In Grafik 4.5 ist der zeitliche Ablauf zwischen Musterprojektion und Belichtungszeit der Kamera dargestellt.

Die Belichtungszeit der Kamera muss innerhalb der Zeitspanne der Musterprojektion liegen, um eine alleinige Aufnahme des gewünschten Musters zu gewährleisten. Ist dies nicht der Fall, werden entsprechend zu einem Teil das komplementäre Muster oder sonstige Lichtverteilungen belichtet, womit das Bild nicht mehr bezüglich des Lichtmusters auswertbar ist.

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

Um verwertbare Aufnahmen zu erhalten, muss deshalb die Belichtungszeit der Kamera an die Lichtprojektion angepasst werden oder die Projektion zum Zeitpunkt der Aufnahme erfolgen.

4.2.5. Zielsetzung

Aus diesen Untersuchungen ergeben sich folgende Zielsetzungen, die das System erfüllen soll, und Eigenschaften, welche vorhanden sein müssen:

- Funktion bei teilweiser Okklusion der Projektion durch Gegenstände außerhalb des Kameraerfassungsbereichs
- Reichweite der Erfassung bis 20 m von der Fahrzeugfront entlang der Fahrtrichtung
- Robustheit gegenüber verschiedenen Umweltbedingungen (unterschiedlicher Untergrund, Texturen, Reflektivität, etc. . .) und Störungen (Fremdlicht)
- Genügende Auflösung im Erfassungsbereich (Maximaldistanz von 5cm zwischen zweier benachbarter Punkte auf der Straßenebene)
- Ausreichende Genauigkeit: < 1 cm am nächsten Punkt zur Fahrzeugfront, < 10 cm bei 20 m Entfernung
- Einfaches und schnelles Kalibrationsverfahren des Gesamtsystems

4.3. Messsystem

In diesem Abschnitt wird das in der Arbeit entwickelte System zur Erfassung der Fahrbahn im Detail vorgestellt. Dabei werden alle Schritte von der Auswahl des Verfahrens bis zur Bearbeitung der Rohmesswerte zur letztendlich weiterverwendbaren 3D-Konstruktion aufgezeigt und das Vorgehen beschrieben.

4.3.1. Verfahrensauswahl

Für die genaue Abstandsbestimmung zu einer durch den Scheinwerfer beleuchteten Szene müssen die einzelnen Punkte, die durch die Kamera erfasst werden, eindeutig zu den entsprechenden Punkten des ausgestrahlten Lichtmusters zugeordnet werden können. Wenn nicht die gesamte Lichtverteilung durch die Kamera erfasst werden kann, sei es durch Einflüsse im physischen Projektions- und Erfassungspfad (Defekte Lichtpixel, Verdeckung, Störlicht, defekte Kamerapixel) oder Fehler im Bildverarbeitungsalgorithmus (Falsche Detektion), kann diese Zuordnung nicht ohne weiteres erfolgen.

Um dieses Eindeutigkeitsproblem zu lösen, existieren viele verschiedene Verfahren, welche sich zum größten Teil jedoch in drei grundlegende Kategorien einteilen lassen [3dshape]. Diese bieten verschiedene Vor- und Nachteile und können je nach Einsatzgebiet ihre besonderen Stärken ausspielen. Wie aufgezeigt weist der Einsatz im automobilen Umfeld viele Eigenheiten und Störquellen auf, welche viele der bekannten Verfahren des Strukturierten Lichts nicht berücksichtigen. Für die Aufgabe im Fahrzeug wird ein System basierend auf räumlicher Kodierung ausgewählt, da eine Erkennung von bewegten Objekten, in diesem Fall die Bewegung der Umgebung relativ zum Egofahrzeug, möglich sein muss. Weiterhin muss die Kodierung aufgrund der gewünschten Robustheit gegenüber Fremdlicht und Texturunterschieden nur im Binärbereich (Schwarz/Weiß) erfolgen.

Räumliche Verfahren mit einer hohen Kodiertiefe nehmen jedoch einen signifikanten Teil der Auflösung der Scheinwerferprojektion in Anspruch und sind anfällig gegenüber wechselnden Umweltbedingungen. Um eine möglichst hohe Auflösung von 3D-Rekonstruktionspunkten zu erhalten und gleichzeitig eine robuste Erkennung des ausgestrahlten Musters zu erreichen, wird ein vergleichsweise simples Verfahren verwendet. Als Resultat wird eine horizontale Streifenlichtprojektion ausgewählt, welche eine hohe Punktdichte quer zu Fahrrichtung ermöglicht und gleichzeitig unempfindlich gegenüber Okklusionen ist.

Der allgemeine Aufbau ist in Abbildung 4.6 schematisch dargestellt.

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

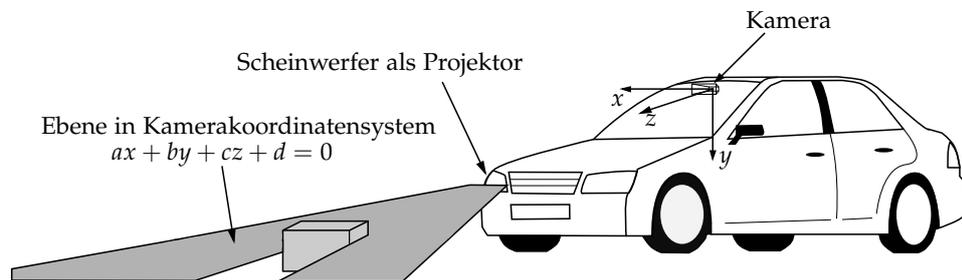


Abbildung 4.6.: Prinzipskizze der Rekonstruktion [Wehle, 2022]

4.3.2. Kalibrierung Messsystem

Im Fahrzeug besteht das Messsystem aus zwei projizierenden Scheinwerfern, sowie einer Kamera mittig im oberen Bereich der Windschutzscheibe. Um die Entfernungen mithilfe des strukturierten Lichts genau berechnen zu können, wird die Epipolareometrie des Gesamtsystems ausgenutzt. Um auf Basis dieser geometrischen Zusammenhänge die Triangulation der relativen Position berechnen zu können, müssen die Positionen der Kamera und der Scheinwerfer zueinander, also die extrinsischen Parameter und die intrinsischen Parameter, bestimmt werden.

Für den Einsatz im Fahrzeug wird ein angepasstes Verfahren entworfen, welches eine schnelle und möglichst genaue Kalibrierung des Aufbaus ermöglichen soll. Dabei wird diese Vermessung des Gesamtsystems in einem Zwischrittverfahren durchgeführt, bei dem erst die Kamera kalibriert und anschließend auf dieser Basis die Projektionseigenschaften der Scheinwerfer bestimmt werden.

Kamerakalibrierung

In Abschnitt 2.4.4 wurde das Abbildungsmodell der Kamera vorgestellt, mit welchem die Pixelposition von Objektpunkten in der realen Umgebungs koordinatensystem auf dem aufgenommenen Bild bestimmt werden kann. Wie gezeigt wurde, ist diese Position im Detail abhängig von der Position und Orientierung der Kamera im Raum, gegeben durch die extrinsischen Parametermatrix, und den internen Eigenschaften der Kamera, dargestellt durch

die intrinsische Parametermatrix. Die Kalibrierung einer Kamera erfolgt durch Bestimmung dieser beiden Matrizen, womit insgesamt 11 Parameter bestimmt werden müssen. Für die Bestimmung der Kameraparameter kann auf bekannte Kamerakalibrationsverfahren, wie beispielsweise beschrieben von Zhang, zurückgegriffen werden [Z. Zhang, 2000]. Für dieses Kalibrierungsverfahren gibt es eine Vielzahl an bereits verfügbaren Toolboxes, die durch die Erfassung besonderer Punkte eines zweidimensionalen Musters mit bekannter Größe die Parameter der Kamera bestimmen können. Hierzu werden aus verschiedenen Entfernungen und Winkeln mehrere Bilder vom Kalibrationsobjekt mit dem entsprechenden Muster aufgenommen und anschließend durch verschiedene Computer Vision Verfahren die bedeutenden Punkte des Musters detektiert. Durch die vorab bekannte Geometrie und Entfernung dieser Punkte in Weltkoordinaten kann ein lösbares Gleichungssystem mit den entsprechenden Kameraparametern aufgestellt werden.

Für die Umsetzung des Verfahrens werden nun verschiedene Posen eines schwarz-weißen und physischen Schachbrettmusters aufgenommen, dessen Seitenlänge der Felder bekannt ist. Die Eckpunkte liefern dabei zuverlässig extrahierbare Merkmalspunkte [Geiger u. a., 2012]. Zur Durchführung der Kalibration wurde dabei auf die Matlab-Implementation innerhalb der Computer-Vision-Toolbox zurückgegriffen. Nach Abschluss sind die intrinsischen Kameraparameter sowie die extrinsischen Parameter je Schachbrettpose in Form einer Rotationsmatrix und eines Translationsvektors in Bezug zur Kamerapose verfügbar. Die jeweiligen Koordinatensysteme sind dabei in Skizze 4.7 dargestellt.

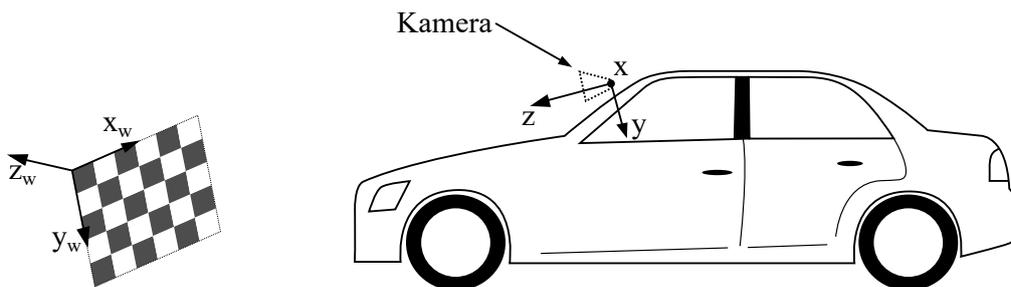


Abbildung 4.7.: Orientierung Weltkoordinatensystem relativ zu Kamerakoordinatensystem je Schachbrettpose [Wehle, 2022]

In bestehenden Produktionslinien wird dieser Vorgang mithilfe von ver-

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

schiedenen Messtafeln durchgeführt. Die extrinsischen Parameter werden im Laufe des Fahrzeuglebens durch eine Onlinekalibrierung aktuell gehalten, um Veränderungen in der Geometrie durch ein Setzungsverhalten der Kamera oder Verformungen der Windschutzscheibe auszugleichen.

Scheinwerferprojektionskalibrierung

Um die soeben genannte Epipolargeometrie des Gesamtsystems auszunutzen und anschließend über die Triangulation die relative Position der Einzelpunkte zum Fahrzeug berechnen zu können, müssen die geometrischen Eigenschaften über den Aufbau und die intrinsischen Eigenschaften der Lichtkomponenten bekannt sein. Genau wie die Kamera auch, entstehen durch die Optik der Scheinwerfer und durch die unterschiedlichen Ausrichtungen des Lichtmoduls verschiedene Abbildungen des projizierten Musters in der realen Welt.

Zur Beschreibung dieses Verhaltens kann ein umgekehrtes Kameramodell auf die Scheinwerfer übertragen werden, welches diese Abbildungszusammenhänge entsprechend durch intrinsische und extrinsische Parameter darstellt. Dabei kann die Beschreibung über eine extrinsische Matrix übernommen werden, welche die Position des Projektors relativ zur Kamera beschreibt, als Rotation und Translation im Raum. Zusätzlich ist eine mathematische Beschreibung der intrinsischen Linienabbildung in der dreidimensionalen Welt vonnöten.

Aus diesem Grund wird die Kamerakalibration durch die Projektion eines horizontalen Streifens je Schachbrettpose erweitert. Diese wird durch das Anschalten aller Pixel einer einzelnen Pixelreihe des μ LED-Array erzeugt, wie in Abbildung 4.8 dargestellt. Entsprechend der Linsengeometrie breitet sich der Horizontalstreifen nun vor dem Fahrzeug aus. Die Projektionsgeometrie des Streifens wird durch die im Scheinwerfer verbauten Schrittmotoren mitgesteuert, weshalb dieser Wert stetig mitberücksichtigt werden muss.

Der Bereich des projizierten Streifens, welcher auf das Schachbrett fällt, ist für die Kalibrierung des ausgesandten Lichtmusters relevant. Um später die im Kamerabild erkannten Streifen auszuwerten, ist eine mathematische

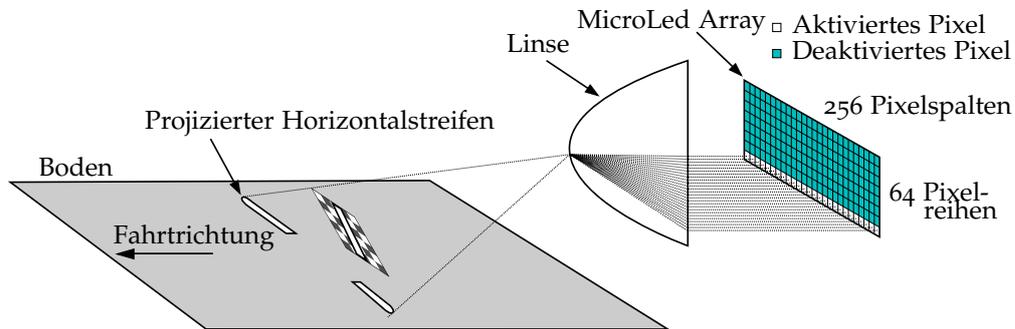


Abbildung 4.8.: Projektion einer Horizontalallinie im Fahrzeugvorfeld durch Aktivierung der untersten Pixelreihe [Wehle, 2022]

Beschreibung des Lichtmusters notwendig. Hierzu wird die Strahlbeschreibung nach [He, Wu und wu, 2017] übernommen und auf den Scheinwerfer angepasst. Dort wird als Lichtquelle ein Laserstrahl verwendet und die Ausbreitung im Raum durch die Ebenengleichung

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4.3)$$

beschrieben.

Der Horizontalstreifen, wie er durch den Scheinwerfer ausgeworfen wird, besitzt jedoch durch die Optikeigenschaften des Lichtmoduls eine ausgeprägte Breite und kann nur ungenau als eine Linienausbreitung modelliert werden. Aus diesem Grund wird der Horizontalstreifen in drei Unterbereiche, wie in 4.9 dargestellt, aufgeteilt, welche laserähnlich in der Breite auf eine Punktbeschreibung reduziert werden können. Die Ober- und Unterkante sind dabei durch ein Maximum im Intensitätsgradienten und die Mitte durch eine maximale Intensität erfassbar, wodurch man drei Ebenenbeschreibungen pro Streifen erhält. Den einzelnen Ebenen werden die Variablen Π_{Sb} , Π_{Sm} und Π_{St} zugewiesen.

Die Aufgabe der Projektionskalibrierung ist es nun, die Parameter der einzelnen Ebenen zu bestimmen. Aus der Kamerakalibration sind die Eckpunkte des Schachbretts gegeben, welche zur Bestimmung der Linienposition im Raum verwendet werden. Wird das Horizontalmuster nun auf das Schachbrett projiziert, so wird der Intensitätsverlauf entlang der Suchbereiche auf dem Schachbrett extrahiert. Da für die Kamerakalibration zusätzlich eine

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

Geringe Höhe / sehr hohe Intensität $\rightarrow \Pi : ax + by + cz + d = 0$

Laserlinie



Oberkante / max. Gradient - pos. Vorzeichen $\rightarrow \Pi_{St} : a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0$

**Projizierter
Horizontalstreifen**



Mitte / max. Intensität $\rightarrow \Pi_{Sm} : a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0$

Unterkante / max. Gradient - neg. Vorzeichen $\rightarrow \Pi_{Sb} : a_3x + b_3y + c_3z + d_3 = 0$

Abbildung 4.9.: Unterscheidung einer projizierten Laserlinie und einem durch ein Scheinwerfer-Kamera-System projiziertes Horizontalmuster [Wehle, 2022]

Aufnahme ohne Projektion vorhanden ist, ist eine Subtraktion beider Bilder möglich, wodurch die reine Projektion erhalten wird.

Die Punktextraktion sucht zu Beginn nach Pixeln maximaler Intensität, welche die Pixelkoordinaten \mathbf{p}_m^s der Mittellinie liefern. Ausgehend von diesen Punkten wird die einzelne Projektionslinie in seiner Breite durchlaufen, um Punkte mit maximalem Gradienten zu bestimmen. Diese liefern die Koordinaten der Unterkantenlinie \mathbf{p}_b^s und der Oberkantenlinie \mathbf{p}_t^s , wie in 4.10 aufgezeigt.

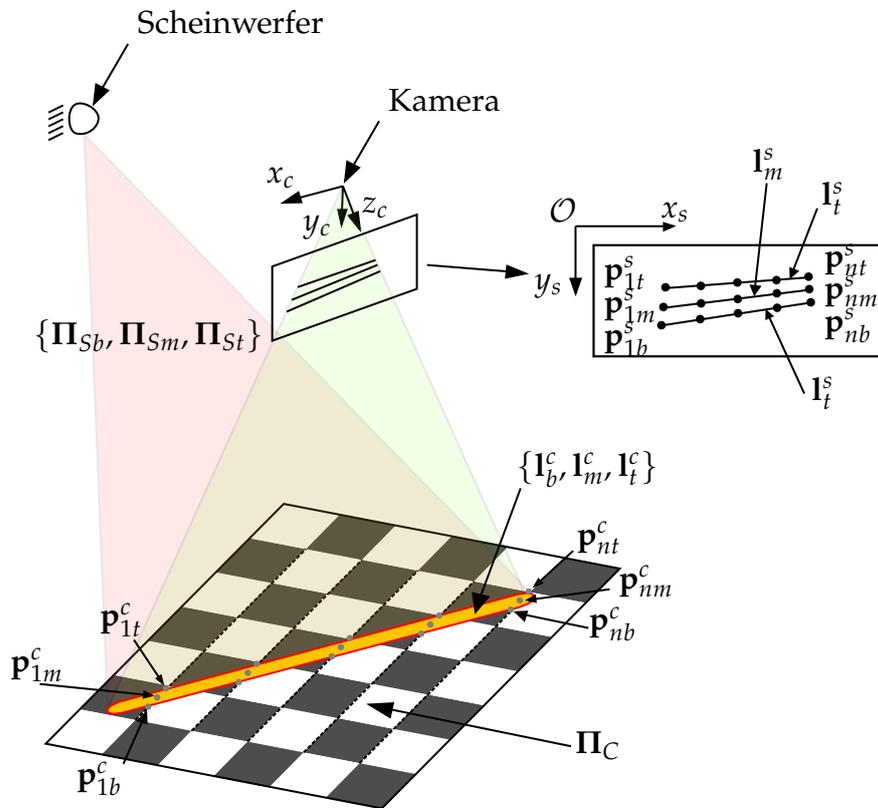


Abbildung 4.10.: Schematische Darstellung des Kalibrationsverfahrens [Wehle, 2022]

Die konkrete Anzahl der bestimmten Punkte pro Linie ist dabei abhängig von der Qualität der Aufnahme, da ausschließliche Punkte weiterverwendet werden, deren Bestimmungskonfidenz über manuell festgelegten Schwellwerten liegt. Für jede Schachbrettpose beschreiben die Punkte die Geraden $\mathbf{l}_b^c, \mathbf{l}_m^c, \mathbf{l}_t^c$ im Raum. Diese entsprechen den Schnittlinien der Projektionsebenen Π_b, Π_m und Π_t mit der Schachbrettebene Π_C , welche aus der Kamerakalibration bekannt ist. Überträgt man die Schnittlinienbestimmung auf mehrere Schachbrettposen im Raum, lassen sich aus diesen die jeweiligen Ebenenparameter der Projektion bestimmen.

Der Normalenvektor je Schachbrettpose kann über die dritte Spalte der Rotationsmatrix beschrieben werden, womit $\mathbf{n}_c = \mathbf{r}_3 = [r_{13} \ r_{23} \ r_{33}]$ ist. Die Schnittgerade des Lichtstrahls ist durch einen Ankerpunkt sowie eine

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

Normalenrichtung $\mathbf{n}_{Li} = [f \ g \ h]$ für $i = 1, \dots, k$ definiert, mit k als Menge der Schachbrettposen.

Unter Verwendung des Normalenvektors $\mathbf{n}_0 = [a \ b \ c]^\top$ und dem Abstand d zum Ursprung wird nun die Ebenengleichung der Strahlebene unter Ausnutzung der hesseschen Normalform

$$\mathbf{x} \cdot \mathbf{n}_0 - d = 0 \quad (4.4)$$

umgeschrieben. Die Strahlebenen Π_S und somit auch deren Normalenvektoren \mathbf{n}_{Sb} , \mathbf{n}_{Sm} und \mathbf{n}_{St} stehen immer senkrecht zu den Schnittgeraden des Lichtstrahls mit dem Schachbrett. Damit gilt

$$\mathbf{n}_{Lb,i}^\top \cdot \mathbf{n}_{Sb} = 0 \quad \mathbf{n}_{Lm,i}^\top \cdot \mathbf{n}_{Sm} = 0 \quad \mathbf{n}_{Lt,i}^\top \cdot \mathbf{n}_{St} = 0, \quad i = 1, \dots, k \quad (4.5)$$

und für alle Ebenen lässt sich ein lineares Gleichungssystem der Form

$$\mathbf{D}\mathbf{n}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{L,1}^\top \\ \mathbf{n}_{L,2}^\top \\ \vdots \\ \mathbf{n}_{L,k}^\top \end{bmatrix} \mathbf{n}_S = \begin{bmatrix} f_1 & g_1 & h_1 \\ f_2 & g_2 & h_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_k & g_k & h_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (4.6)$$

aufstellen, welches überbestimmt ist. Zur Lösung wird eine Singulärwertzerlegung angewendet. Der verbleibende Parameter d wird unter einer Minimierung der Fehlerquadrate zwischen Geraden und Ebene bestimmt.

Die durchgeführte Minimierung der algebraischen Distanz führt im ersten Schritt jedoch zu keiner Minimierung der geometrischen Distanz. Wenn man die extrahierten Bildpunkte \mathbf{p}_b^s , \mathbf{p}_m^s und \mathbf{p}_t^s mit dem entsprechenden Sichtstrahl projiziert, kann man eine Abweichung zu den Ebenen aus der Kamerakalibrierung nach [Z. Zhang, 2000] erkennen. Um diese Abweichung zu minimieren, wird eine nachgelagerte geometrische Optimierung durchgeführt. Dabei wird der Nichtlineare Optimierer von Matlab verwendet und mit den vorhandenen Ebenenparametern initialisiert. Bei den durchgeführten Messungen wurde die euklidische Distanz um etwa 48 % pro Kante reduziert, wie in 4.1 aufgezeigt.

Auf diese Weise werden nun beide Fahrzeugscheinwerfer mit ihren respektiven Linienprojektionen kalibriert. In 4.11 ist das Kalibrierungsergebnis

Arithmetischer Mittelwert der euklidischen Distanz [mm]	ohne nichtlin. Optimierung	mit nichtlin. Optimierung	Δ [%]
Unterkante	53,5	30,0	44
Mitte	72,9	26,2	64
Oberkante	33,4	21,3	36

Tabelle 4.1.: Vergleich euklidische Distanz zwischen triangulierten Koordinaten und Koordinaten auf den Schachbrettposen entsprechend der Kamerakalibration

am Beispiel der Unterkante eines Scheinwerfers dargestellt. Der erste und letzte extrahierte Linienpunkt sind durch rote Kreuze auf den Schachbrettabenen markiert und die rekonstruierten Punkte durch blaue Quadrate eingezeichnet.

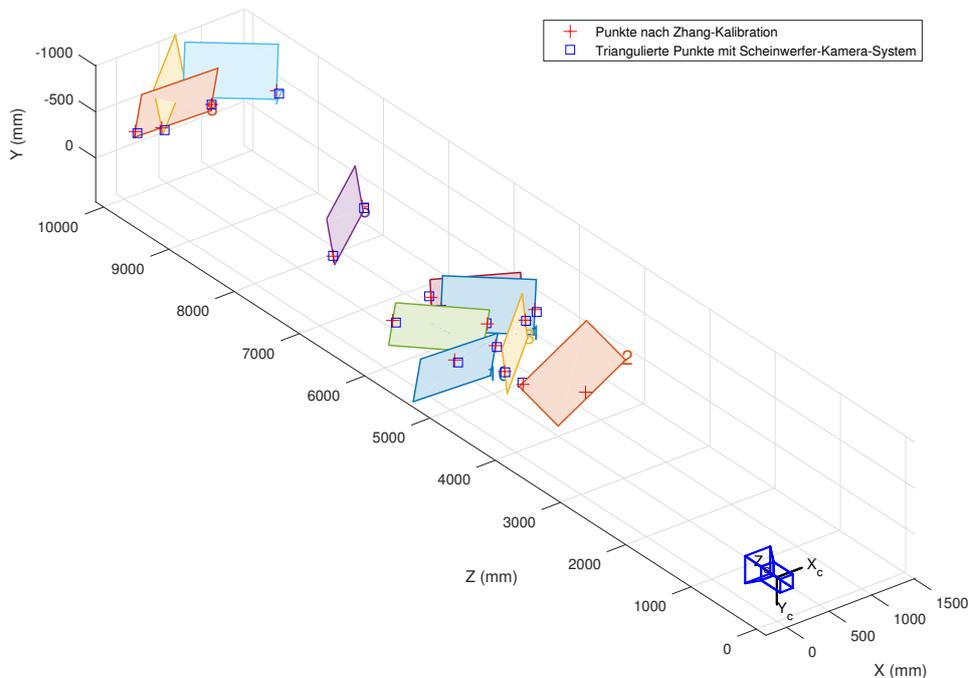


Abbildung 4.11.: Vergleich zwischen spezifischen triangulierter und auf der Kamerakalibration basierender Punkte inkl. nichtlinearer Optimierung der Ebenenparameter

Im Einsatzleben des Fahrzeugs können wie bei der Kamera auch die intrinsischen Parameter des Scheinwerfers als konstant betrachtet werden. Durch

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

verschiedene Materialänderungen kann sich jedoch die Position zueinander verändern, wodurch die extrinsische Matrix durch eine Onlinekalibration angepasst werden muss. Für die Kalibration eines Kamera-Projektor-Paares liefert hierbei Moreno eine robuste Abwandlung, bei der der Projektor als inverse Lochkamera modelliert und durch eine Homographiebeschreibung des ausgestrahlten Musters die intrinsischen sowie extrinsischen Parameter bestimmt werden können [Moreno und Taubin, 2012]. Durch eine integrierte Wanderkennung im Fahrzeug kann somit eine Überprüfung der abgespeicherten extrinsischen Parameter durchgeführt und bei Bedarf überprüft werden.

4.3.3. Merkmalsextraktion

Nachdem das Gesamtsystem kalibriert wurde, muss ein Verfahren entworfen werden, um die Kanten aus den Bildern der Fahrerassistenzkamera zu extrahieren. Während eines beliebigen Fahrzustandes existieren jedoch keine kontrollierten Bedingungen, deren Vorwissen für die Erfassung verwendet werden könnte, weshalb ein möglichst robuster Extraktionsansatz von größter Bedeutung ist. Dazu muss das System die projizierten Lichtmuster im Kamerabild erkennen und zuverlässig die Pixelpositionen ausweisen.

Die spätere 3D-Rekonstruktion der Fahrbahn setzt sich aus der Auswertung aller Frames des Videofeeds zusammen. Der in 4.12 aufgezeichnete Algorithmus berechnet dabei Rekonstruktion für jeden einzelnen Bildframe i . Auf jedem Bild werden über YOLOv4 S Bounding Boxen detektiert und das Bild anschließend frequenzgefiltert. Für jede Bounding Box j werden nun die Unterkante, Mitte und Oberkante extrahiert und bewertet, wobei das beste Merkmal zur 3D-Rekonstruktion weiterverwendet wird. Die rekonstruierten Punkte werden abschließend über ein Tracking der Fahrzeugbewegungen in die aktuell im System hinterlegte Punktwolke integriert.

Der gesamte Algorithmus wurde dabei in Python unter Verwendung der OpenCV Bibliothek umgesetzt.

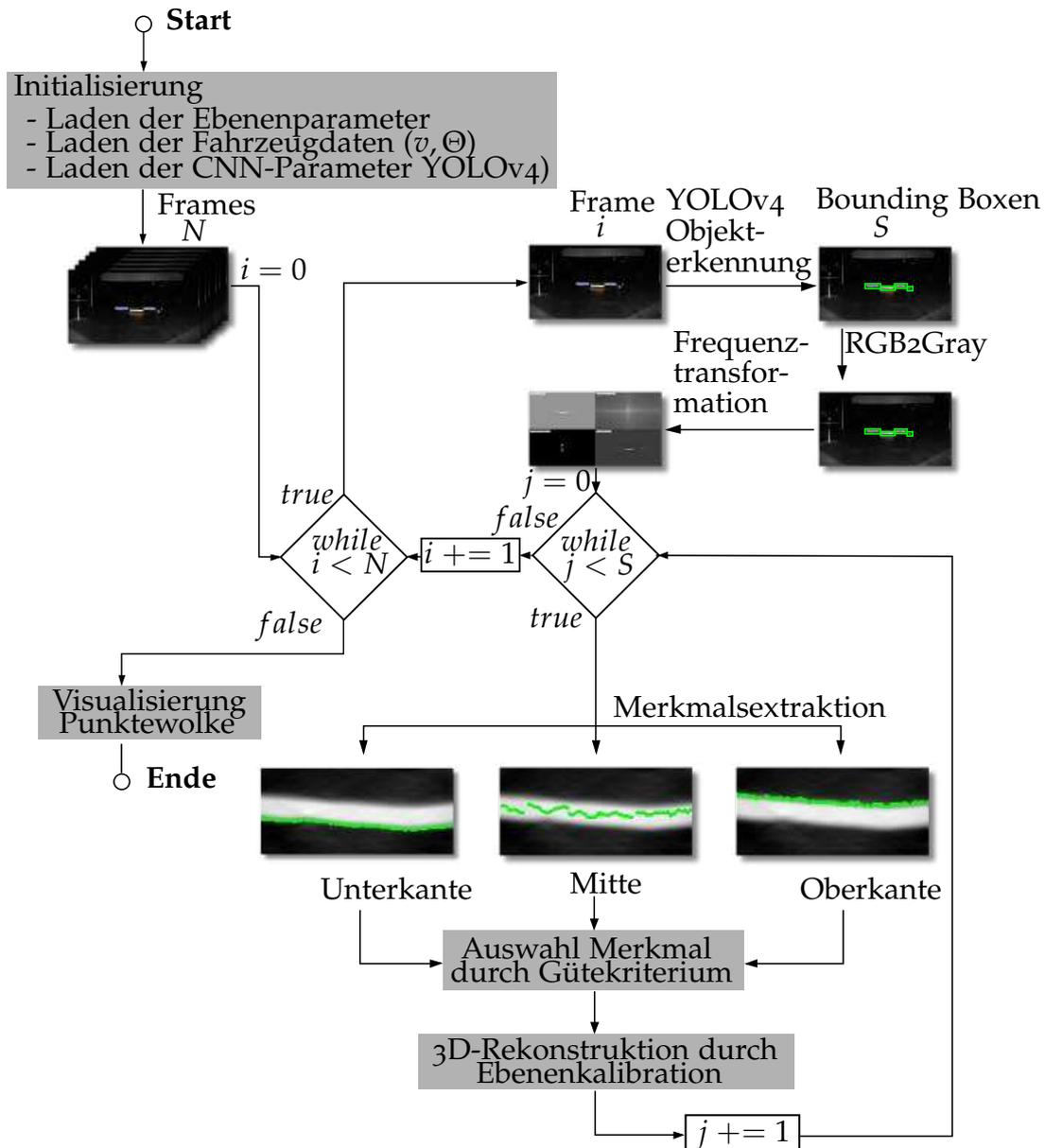


Abbildung 4.12.: Schematischer Ablauf des Algorithmus zur 3D-Rekonstruktion einer Szene

Liniendetektion

Der erste Schritt im Ablauf ist die Erkennung der projizierten Horizontallinien im Bild als Vorverarbeitung für die anschließende Positionsextraktion. Dafür wird eine Objektdetektion über ein neuronales Netz verwendet, welches die ungefähre Position über Bounding Boxen ausgibt. Um eine möglichst einfache Serienimplementation zu ermöglichen, wird dabei auf eine möglichst geringe rechnerische Komplexität Wert gelegt.

Im Rahmen der Arbeit wird das bewährte Convolutional Neural Network YOLOv4 [Bochkovskiy, C.-Y. Wang und Liao, 2020] eingesetzt, welches eine Erweiterung des YOLO [Redmon, Divvala u. a., 2016] und eine Weiterentwicklung des Backbone-Netzwerks in YOLOv3 [Redmon und Farhadi, 2018] darstellt. YOLO verbindet die beiden Aufgaben der Regionsfindung und der Objektklassifizierung in einem einzigen Netzwerk, was das Netz deutlich recheneffizienter macht.

YOLOv4 basiert dabei auf einem über den Datensatz ImageNet Deng u. a., 2009 vortrainierten Netz. Es kann deshalb mit einem stark reduzierten Zeitaufwand für die neue Anwendung adaptiert werden, da nicht das komplette Netzwerk von Neuem trainiert werden muss [Daglioglu, 2021].

Als Trainingsdatensatz für die Projektionserkennung wurden ungefähr 2650 händisch gelabelte Bilder unter möglichst verschiedenen und vielfältigen Umgebungsbedingungen bei unterschiedlichen Umgebungshelligkeiten verwendet. In 4.13 werden beispielhafte Bilder aus dem Trainingsdatensatz dargestellt. Dabei werden bei einer Unterbrechung des einzelnen Streifens jedem Teilabschnitt einzelne Bounding Boxen zugeordnet. Ziel dabei ist es, mehrere einzelne Objekte zu erhalten, die auf gleiche Weise beschrieben und damit vom nachgelagerten Extraktionsalgorithmus gleichermaßen verarbeitet werden können.

Zur Validierung des trainierten Netzes wurde ein Testdatensatz mit 250 Bildern aufgestellt, dessen Aufnahmen in anderen Regionen aufgezeichnet wurden. Als Resultat ergab sich eine Average Precision (AP) von 96,84 % bei einem minimalen IoU_{pred}^{truth} von 0,5. Dieser Wert zeigt eine Einsatzfähigkeit in den meisten Szenarien, sowie eine geringe Ausfallswahrscheinlichkeit auf.

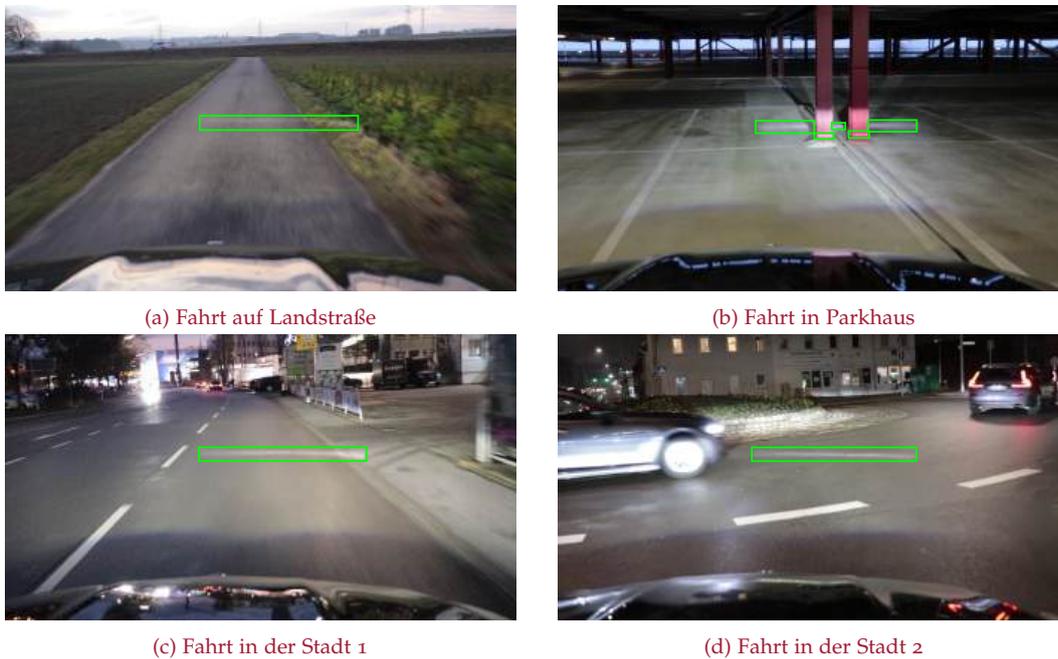


Abbildung 4.13.: Ausschnitte aus dem Trainingsdatensatz für YOLOv4

Frequenzfilterung

Nachdem die ungefähre Position der Projektion bekannt ist, müssen aus den extrahierten Bildabschnitten die Linienkanten extrahiert und die Pixelpositionen bestimmt werden. Für diese klassische Aufgabe der Bildverarbeitung gibt es bereits zahlreiche Detektionsverfahren wie etwa der LSD [Gioi u. a., 2010] oder Verfahren nach Trujillo-Pino [Trujillo-Pino u. a., 2012].

Bei Implementierung dieser werden jedoch schnell zwei Herausforderungen ersichtlich. So ist der Gradient des Horizontalmusters gering, wodurch sich eine Parametrisierung innerhalb der Algorithmen als schwierig gestaltet. Niedrige Schwellwerte führen zu einer Vielzahl an Fehldetektion, wohingegen bei hohen Schwellwerten die weichen Kanten nicht erkannt werden. Weiterhin ist das Bild oftmals mit Störlichtern überlagert, wodurch kein zufriedenstellender Kompromiss zwischen Robustheit und einer minimalen Anzahl an Fehldetektionen erreicht werden kann.

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

Daher werden die Randbedingungen des Fahrzeug-Scheinwerfer-Aufbaus ausgenutzt, um die Bilder vorzubearbeiten. Durch die vorliegende Geometrie und den eingeschränkten Dynamikbereich des Fahrwerks kann von einer konstant horizontalen Ausrichtung der Projektion ausgegangen werden, so dass ohne Verlust von Bildinformationen eine Frequenzfilterung des Bildes durchgeführt werden kann.

Die Frequenztransformierte eines Bildes über eine diskrete Fouriertransformation ist beschrieben durch

$$F[u, v] = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} f[x, y] e^{-i2\pi ux/X} e^{-i2\pi vy/Y} \quad (4.7)$$

mit u und v als Koordinaten im Frequenzbereich.

Abbildung 4.14 zeigt den Filter, der anschließend auf diese Transformation angewendet wird. Im Frequenzbereich sorgen die horizontalen Streifen für Anteile, die sich vertikal in Richtung der v -Achse zusammensetzen. Um Variationen von der idealen Horizontallage, die sich durch Objekte im Frontfeld und der Fahrwerksdynamik ergeben, auszugleichen, verbreitet sich der Filter bei höheren Frequenzen. Durch die Optikauslegung des Scheinwerfers besitzt die Streifenprojektion relativ weiche Gradienten, weshalb sehr hohe Frequenzen nicht beachtet werden müssen. Der Filter kann somit in seinem Maximalbetrag limitiert werden, welches als Nebenwirkung zu einer Weichzeichnung des Bildes führt.

Der Gesamtprozess ist in 4.15 dargestellt. Zu Beginn werden wie links oben dargestellt Pixel geringer Intensität aus dem Graustufenbild herausgefiltert, indem ihnen der Grenzwert von 150 zugewiesen wird. Rechts oben ist die Frequenztransformierte des Bildes dargestellt, worauf der Filter links unten appliziert wird. Zum Schluss erhält man das gefilterte und rücktransformierte Bild unten rechts, in welchem nicht benötigte Teile der Bildinformationen deutlich reduziert und damit die Aufgabe der nachgelagerten Kantendetektion erleichtert wurden.

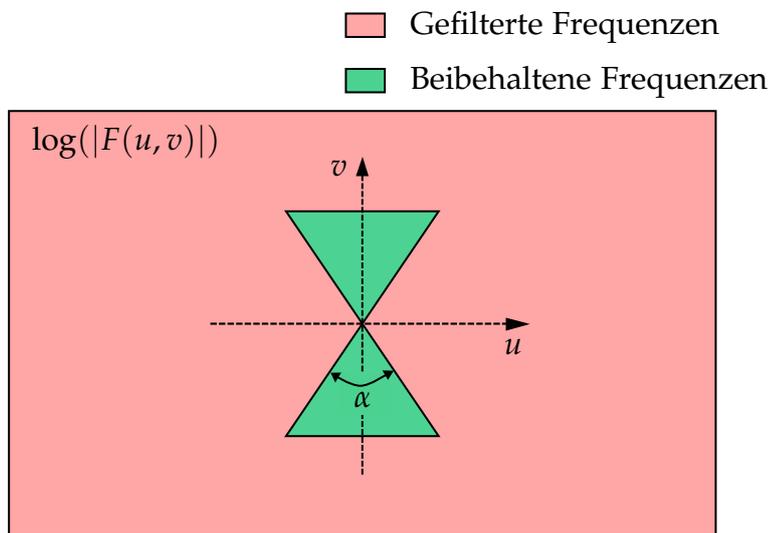


Abbildung 4.14.: Schematische Darstellung des Filterdesigns

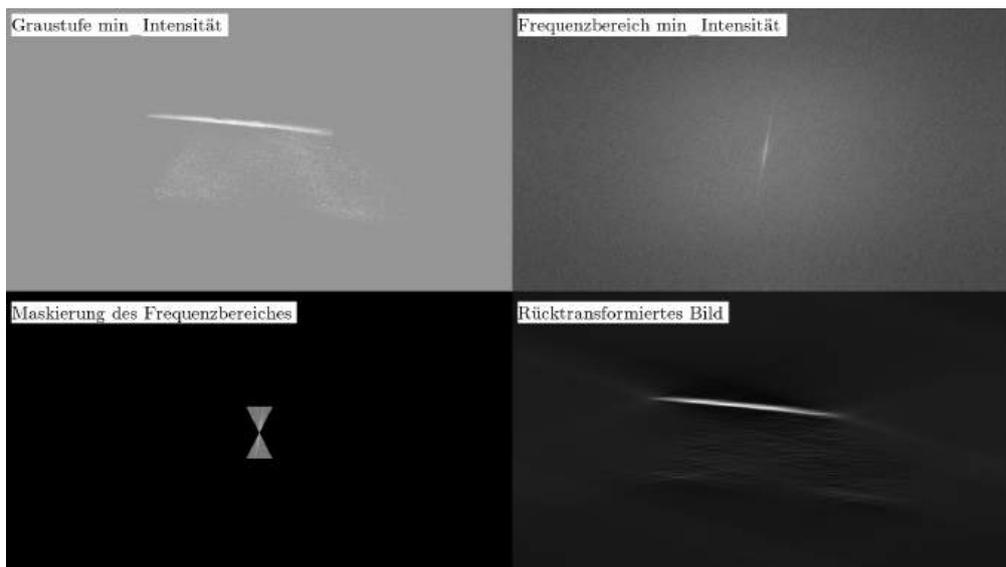


Abbildung 4.15.: Darstellung des Einflusses einer Frequenzfilterung

Kantenextraktion

Als abschließender Schritt müssen für jede einzelne Bounding Box die Unterkante, Mitte und Oberkante der Streifenprojektion ermittelt werden. Hierzu wird jede Pixelspalte innerhalb nacheinander ausgewertet und eine Reihe an Pixeln definiert, welche einem der Merkmale entspricht. Die Auswertung verläuft dabei initial analog zur Projektionskalibration, indem nach Pixeln mit maximaler Intensität und Gradienten gesucht wird. Durch die Variationen durch Texturen, Lichtverhältnisse, etc., kommt es mitunter zu starken vertikalen Variationen. Ein anschließendes Clusteringverfahren wird deshalb eingesetzt, um vereinzelte Ausreißer zu detektieren.

Dazu wird der k -Means-Algorithmus verwendet, welcher sich aufgrund der kontrollierten Rahmenbedingung gut für die Anwendung eignet. Er wird pro Kante bzw. Mittenlinie angewandt und teilt die extrahierten Punkte so ein, dass die Summe der Residuenquadrate (SRQ) zu den k Schwerpunkten der gebildeten Cluster minimiert wird. Dabei kann k bereits vorher festgelegt werden, da die Anzahl an Bounding Boxes bereits bekannt ist. Alternativ kann durch den Einsatz des Kneedle-Algorithmus [Satopaa u. a., 2011] die Anzahl dynamisch bestimmt werden, um eventuelle Teilokklusionen besser zu berücksichtigen.

Die extrahierten Pixelpositionen können sich in ihren Eigenschaften auf zwei Arten unterscheiden, welche auch als Eingangsgrößen für das Verfahren verwendet werden. Diese betrifft die Position in der Vertikalen sowie die bestimmte Intensität bzw. den Gradient. Um Ausreißer herauszufiltern, wird für jede Spalte ein Eigenschaftsfaktor definiert, welcher der Multiplikation aus der Pixelreihe und dem Gradienten bzw. der Intensität eines relevanten Pixels in y -Richtung entspricht. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass Ausreißer in ihrem jeweiligen Cluster betrachtet werden und somit stark fehlerdurchsetzte Cluster komplett verworfen werden können.

Im Normalfall jedoch werden die erhaltenen Werte pro Cluster weiter ausgewertet und die Verteilung als Standardnormalverteilung modelliert. Somit können Punkte außerhalb der zweifachen Standardabweichung als Ausreißer eliminiert werden. In Zeichnung 4.16 ist eine beispielhafte Kantenextraktion am Beispiel einer Unterkante aufgezeigt. Gültige Pixel sind

grün markiert, wohingegen rote Pixel Ausreißer darstellen und verworfen werden.

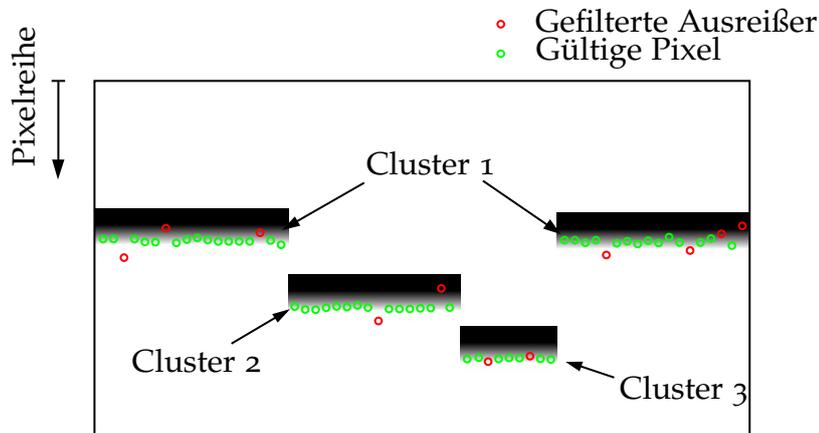


Abbildung 4.16.: Schematische Darstellung der Detektion von Ausreißern

4.3.4. Gütekriterium zur Ebenenauswahl

Nach den bisher erfolgten Schritten erhält man jeweils eine Menge an Pixeln für die Unter-, Oberkante und Mitte pro projiziertem Horizontalstreifen. Diese können nun mit der kalibrierten Ebenenbeschreibung trianguliert werden, um die entsprechenden 3D-Koordinaten zu erhalten. Um jedoch die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen, wird pro Bounding Box nur eine Kante verwendet. Dies hat den Hintergrund, dass, je nach Textur des Untergrunds und des Störlichts, Intensitäten besser extrahiert werden können als Gradienten oder umgekehrt.

Zur Bewertung der Qualität wird dabei die Homogenität der Einzelpixel pro Kante bewertet und verglichen. Dieser Vorgang wird dabei für jede einzelne Bounding Box wiederholt. Die Homogenität wird dabei über die Summe der vertikalen Pixelpositionen im Vergleich zum Nachbarpixel berechnet:

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} (y_j^s - y_{j-1}^s)^2}{N_i} \quad i = 1, \dots, 3 \quad (4.8)$$

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

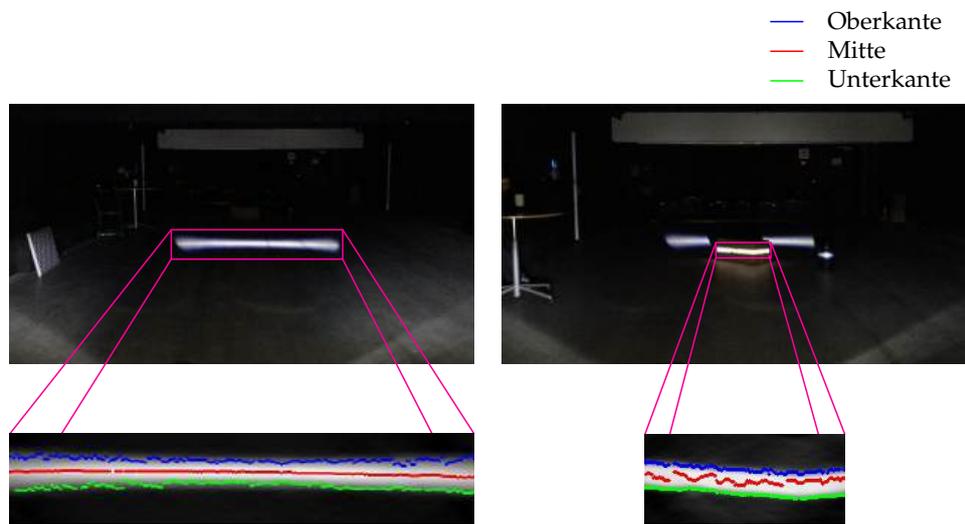


Abbildung 4.17.: Visuelle Unterscheidung der Reflexionseigenschaften verschiedener Objekte im Fahrzeugvorfeld

Diese Auswahl hat den Hintergrund, dass übermäßig starke Sprünge zwischen Nachbarpixeln aufgrund der bereits erfolgten Einteilung durch die Objektdetektion nicht zu erwarten sind. Die Unterscheidung beider Fälle soll durch 4.17 visualisiert werden. Das linke Bild zeigt eine Projektion auf eine raue Fahrbahn, das rechte Bild eine Projektion desselben Streifens auf Lost Cargo. Beide Szenarien unterscheiden sich voneinander durch den Auftreffwinkel des Lichtstreifens sowie die Textur der Oberflächen. Aus dieser Kombination ergeben sich auf der Fahrbahn stark variierende Kantenverläufe, wie in grün und blau hervorgehoben. Im Vergleich hierzu verläuft die Mittendetektion äußerst homogen und wird deshalb für die 3D-Rekonstruktion auserwählt. Auf dem Lost Cargo hingegen lässt sich ein genau gegenteiliges Verhalten beobachten. Die Mittellinie weist starke Variationen auf, wohingegen die Kanten und insbesondere die Unterkante einen homogenen Verlauf aufweisen. Aus diesem Grund wird für diese Box die Unterkante zur 3D-Rekonstruktion ausgewählt.

4.3.5. Linien

Um trotz des Fokus auf Genauigkeit und das damit einhergehende Verwerfen von Informationen eine hohe Auflösung zu erhalten, wird das bisherige Vorgehen auf einen Einsatz von vier übereinander angeordneten Horizontalstreifen erweitert. Aufgrund der Eigenschaften des Lichtmoduls und der Geometrie der Projektion ist eine weitergehende Erhöhung der Streifenanzahl nicht möglich. In Bild 4.18 ist die Vierstreifenprojektion auf eine ebene Fahrbahn vor dem Fahrzeug in der seitlichen Vogelperspektive dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die longitudinale Ausdehnung und die durch die Optik verursachten Farbsäume, welche eine weitere Steigerung verhindern.



Abbildung 4.18.: Seitliche Vogelperspektive auf die Streifenprojektion vor dem Fahrzeug

Während der Fahrt kann es durch Extraktionsfehler, Okklusion und Verschiebungen im Kamerabild durch große Objekte im Frontfeld dazu kom-

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

men, dass ein Teil der Linien nicht erkannt wird oder die ursprüngliche vertikale Reihenfolge nicht mehr zutrifft. Da reine Horizontalstreifen ohne weitere Merkmale projiziert werden, kann in diesem Fall keine korrekte Zuordnung zum ausgestrahlten Projektionsmuster hergestellt werden. Um unter diesen Umständen eine korrekte Zuordnung der Liniensegmente zu den ursprünglichen Streifenprojektionen zu gewährleisten und eine 3D-Rekonstruktion zu ermöglichen, wird deshalb das Verfahren nach Brink et al. [Brink, Robinson und Rodrigues, 2008] adaptiert, welches maximale Spannbäume zur Einteilung verwendet.

4.3.6. Zusammenführen zur 3D-Rekonstruktion

Nach Abschluss der Kalibrierung und der durchgeführten Pixelextraktion ist der Zusammenhang zwischen den Kantenelementen und deren Koordinaten innerhalb des Kamera- und Scheinwerferkoordinatensystems bekannt. Wie in 4.19 aufgezeigt, ermöglicht dieser nun die Triangulation am Auftreffpunkt des Projektionsbereichs im Fahrzeugvorfeld. Aufgrund der während der Fahrt erfolgenden Bewegung des Fahrzeuges wird das Fahrzeugvorfeld nun fortlaufend gescannt.

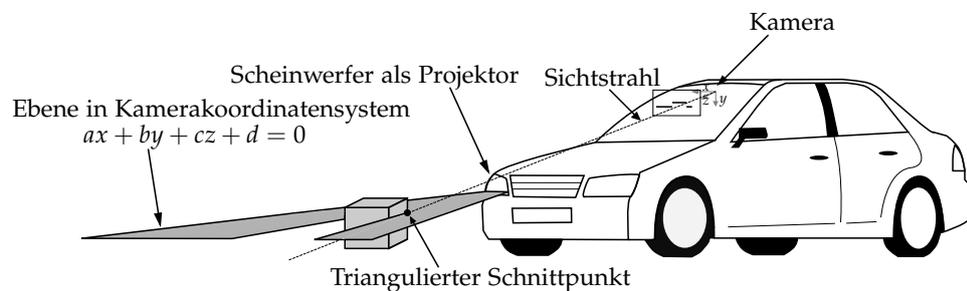


Abbildung 4.19.: Triangulation zwischen Projektionsebene und Kamerasichtstrahl

Um jedoch aus den Auswertungen der Einzelbilder eine umfassende Beschreibung des gesamten Fahrzeugfrontfeldes zu erhalten, müssen die extrahierten 3D-Punkte aus den Einzelbildern zu einer gesamten Punktwolke zusammengefügt werden. Dabei legt das Fahrzeug während der Fahrt zwischen den einzelnen Frames verschiedene Strecken zurück und die Scheinwerfer-/Kameraposition variiert zusätzlich über die Bewegungen der

Fahrzeugkarosserie. Der Zusammenhang ist in Abbildung 4.20 am Beispiel der Fixierung am Kamerakoordinatensystem dargestellt.

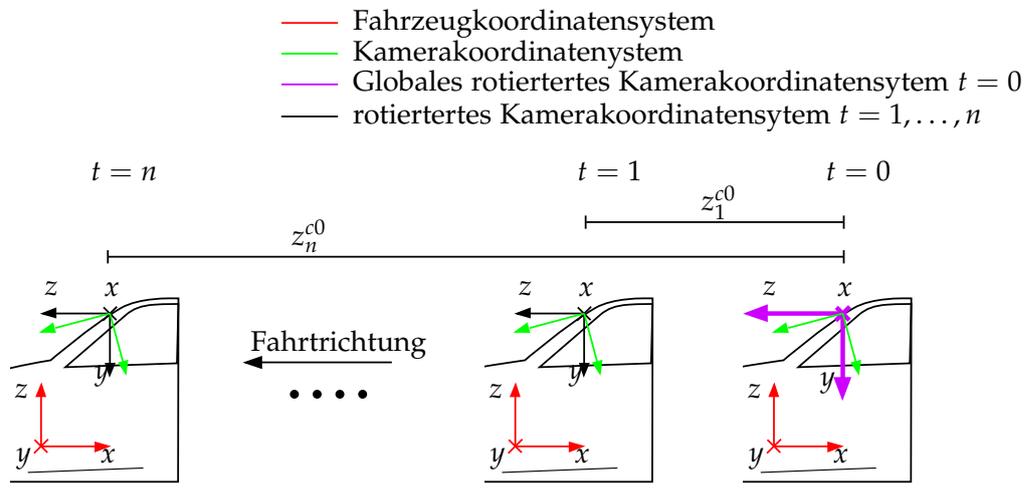


Abbildung 4.20.: Beschreibung einer Szene im globalen rotierten Kamerakoordinatensystem

Die Bewegung des Fahrzeugs parallel zur Fahrbahn ist als Geschwindigkeitsinformationen im CAN-Bus des Fahrzeugs enthalten und die Rotations- und Translationsbewegungen des Scheinwerfers relativ dazu werden in Kapitel 6 behandelt. Mit Hilfe dieser Werte werden nun die Punktwolken jedes Frames zu einer Punktwolke des kompletten Szenarios, definiert im global rotierten Kamerakoordinatensystem, zusammengesetzt.

4.4. Ergebnisse

Zur Bewertung der Qualität der 3D-Rekonstruktion wurden Testaufnahmen in verschiedenen Szenarien durchgeführt. Dabei wurde aufgrund der flexibleren Software-Schnittstelle auf eine externe digitale Spiegelreflexkamera des Typs Canon EOS 77D zurückgegriffen, welche auf eine fahrzeugtypische Auflösung von 1080×1920 , sowie einer Bildwiederholrate von 30 Hz gesetzt wurde. Die Ansteuerung erfolgte über die Python-Bibliothek der DigiCamControl-Applikation.

4.4.1. Vorgehen

Die Bewertung erfolgt anhand von drei Überfahrtsszenarien, welche die Rekonstruktion von Objekten sowie die Erfassung der reinen Fahrbahn umfassen. Das Resultat der einzelnen Fahrten ist eine Punktwolke, welche das gesamte Fahrzeugfrontfeld, das durch die Horizontalstreifen eingefasst wurde, einschließt. Die erreichte Punktedichte hängt dabei von der Fahrtgeschwindigkeit im jeweiligen Abschnitt und der Bildwiederholrate der Aufnahme ab. Die Geschwindigkeit der Überfahrten beträgt dabei ungefähr $5,6 \frac{m}{s}$. Die tatsächlich erreichte Punktdichte wird dabei natürlich auch stark von der Erfolgsrate der Objektdetektion und der Mermalsextraktion bestimmt.

Um auch eine objektive Bewertung der Ergebnisse vornehmen zu können, werden die Ergebnisse mit den Aufnahmen einer Intel RealSense D455 verglichen. Dabei werden systematische Fehler über eine initiale Rotation und Translation der Punktwolken zueinander reduziert. Für die Evaluation wird dabei die Open-Source Software CloudCompare [CloudCompare, 2023] verwendet.

4.4.2. Szenario 1

Der Umfang des ersten Szenarios besteht aus zwei nebeneinander platzierten Objekten. Dieses Szenario soll zeigen, inwieweit der Algorithmus in der Lage ist, mehrere Bounding Boxen innerhalb eines Frames zu verarbeiten.

Zum besseren Verständnis der Abhängigkeit und der Ausprägung zeigt [4.21](#) einen Frame, welcher einem Szenario bestehend aus Scheinwerfer-Kamera-System und einem Objekt mit geringer Entfernung entspricht. Das projizierte Horizontalmuster ist lediglich auf einem Teilbereich des linken Objektes erkennbar. Dementsprechend wird ausschließlich der Bereich, in welchem das Muster das Objekt trifft, ausgewertet. Alle Bereiche des Objektes außerhalb des projizierten Musters werden nicht rekonstruiert.

Die Analyse der einzelnen Perspektiven in [4.22](#) zeigt, dass die Erkennung von zwei Objekten innerhalb des FOV möglich ist. Die absoluten Abmaße

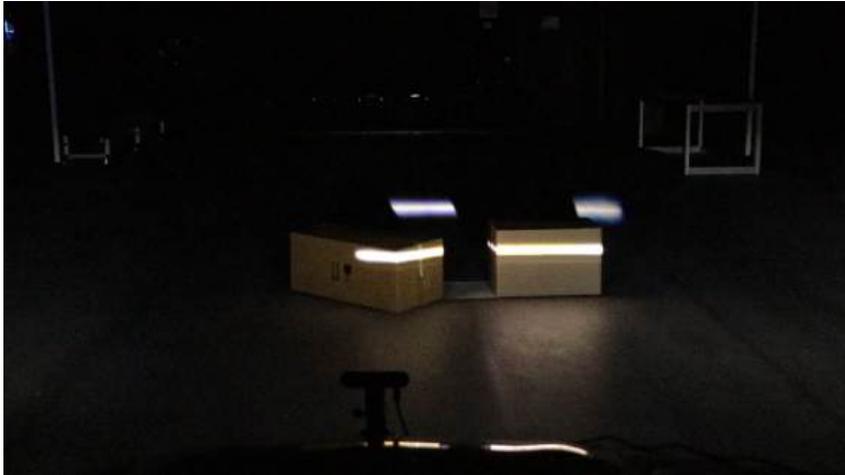
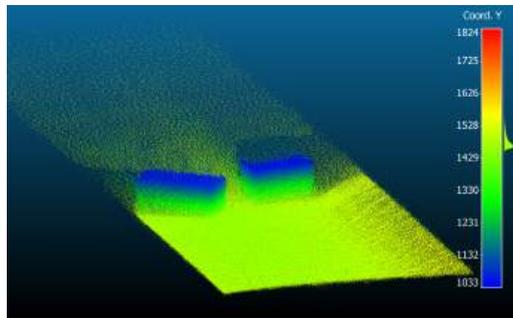


Abbildung 4.21.: Darstellung der Ausprägung des Horizontalmusters auf einem Objekt bei geringem Abstand zwischen Objekt und Scheinwerfer-Kamera-System

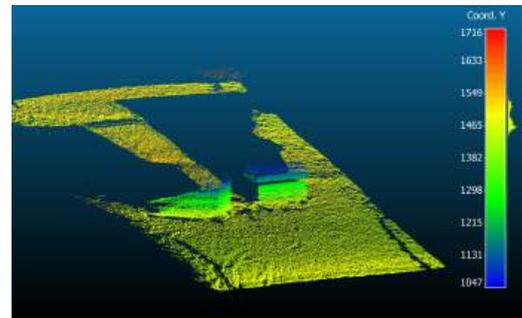
sind erneut erkennbar und korrelieren mit den Messdaten der Intel RealSense D455. Im rot markierten Bereich in 4.22d treten Fehldetektionen auf, welche auf den Grenzbereich des projizierten Horizontalmusters zurückführbar sind. Generell ist insbesondere in 4.22d das FOV des Scheinwerfer-Kamera-Systems sichtbar. Der rot markierte Bereich weist auf die distanzabhängige Detektionsbreite des Scheinwerfer-Kamera-Systems hin. Zu einem Zeitschritt, in welchem der Abstand zwischen Objekt und Fahrzeug so groß ist, dass die komplette Box beleuchtet wird, ist die Erkennung der vollständigen Breite des linken Objekts möglich. Bei einer weiteren Annäherung beleuchtet das projizierte Horizontalmuster ausschließlich einen Teilbereich des linken Objektes, weshalb die rekonstruierte Punktwolke eine linear abnehmende Breite des Objektes wiedergibt.

Die Überlagerung beider Punktwolken in 4.23a zeigt einerseits das bereits im ersten Szenario wahrgenommene Phänomen einer reduzierten Breite des rechten Objektes im Scheinwerfer-Kamera-System. Andererseits ist die relative Lage der Objekte zueinander und die absolute Höhe beider Technologien vergleichbar. Die optisch sichtbare Korrelation wird in einem Ausschnitt, welcher beide Objekte umfasst, berechnet. Die Ermittlung der MNND ergibt 8,9 mm mit der Standardabweichung 5,9 mm. Die Visualisierung der NND im ausgewerteten Bereich in 4.23b zeigt erneut homogene Bereiche

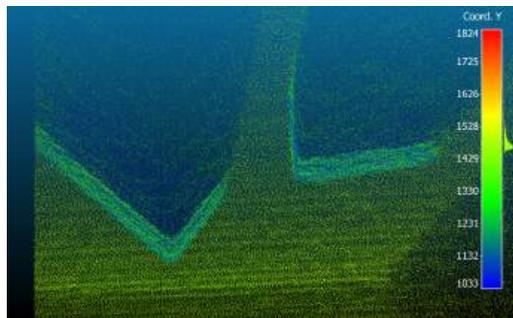
4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion



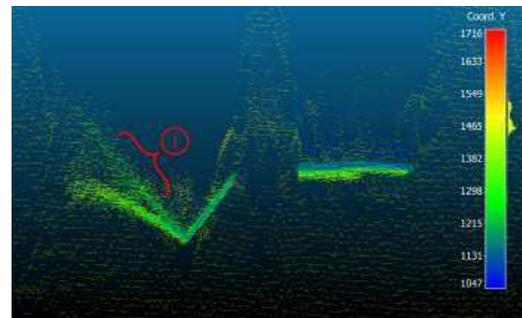
(a) Perspektive 1 - Intel RealSense D455



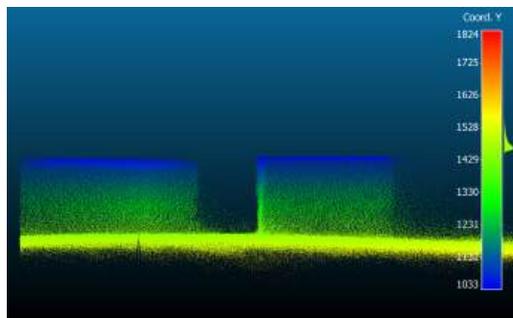
(b) Perspektive 1 - Scheinwerfer-Kamera-System



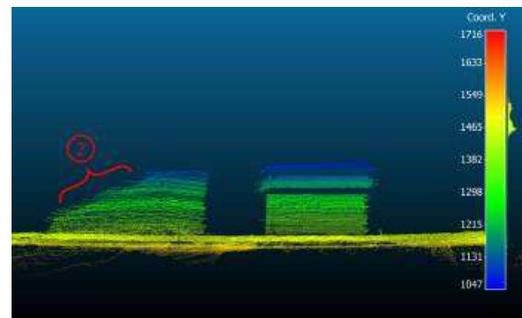
(c) Perspektive 2 - Intel RealSense D455



(d) Perspektive 2 - Scheinwerfer-Kamera-System



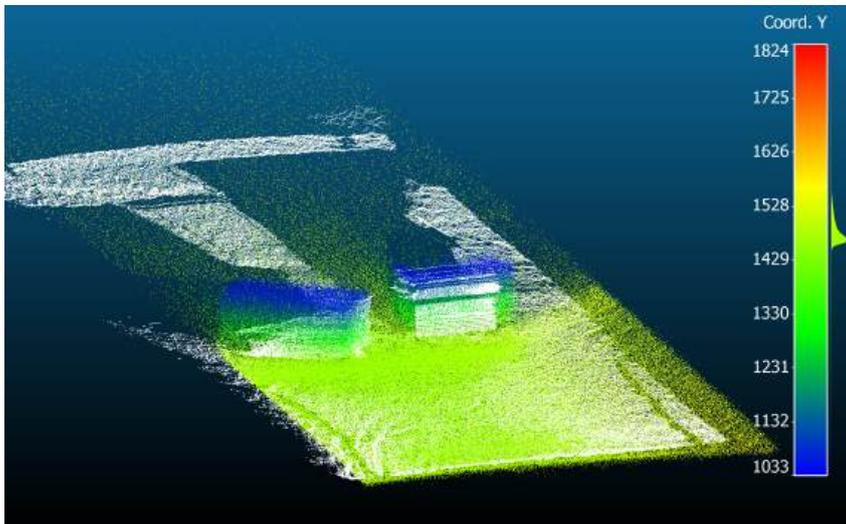
(e) Perspektive 3 - Intel RealSense D455



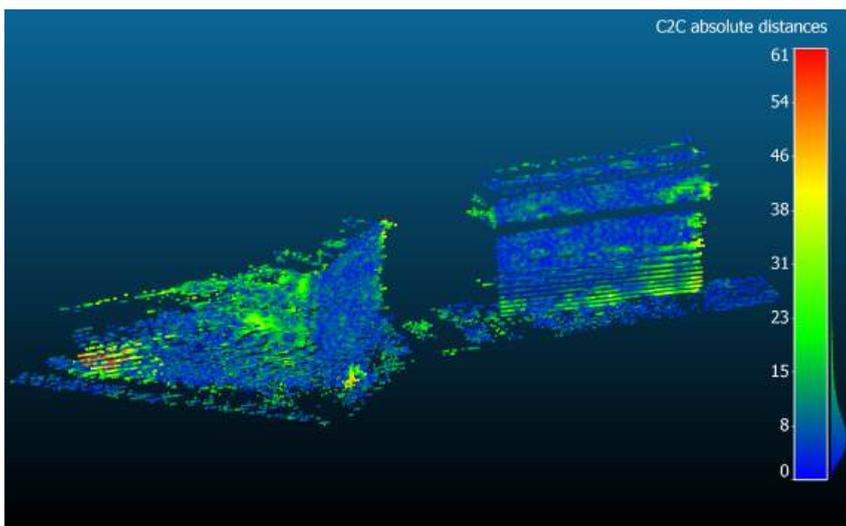
(f) Perspektive 3 - Scheinwerfer-Kamera-System

Abbildung 4.22.: Ergebnisse Szenario 1 - Scheinwerfer-Kamera-System und Intel RealSense D455 im Vergleich

mit geringem Abstand zueinander, wobei vermehrt Abweichungen in den Randbereichen der Objekte wahrnehmbar sind.



(a) Perspektive 1 - Überlagerung Intel RealSense D455 (farbig) und Scheinwerfer-Kamera-System (weiß)



(b) Detailansicht - Darstellung Nearest-Neighbor-Distance des Scheinwerfer-Kamera-Systems relativ zu dem Rekonstruktionsergebnis des Intel RealSense D455

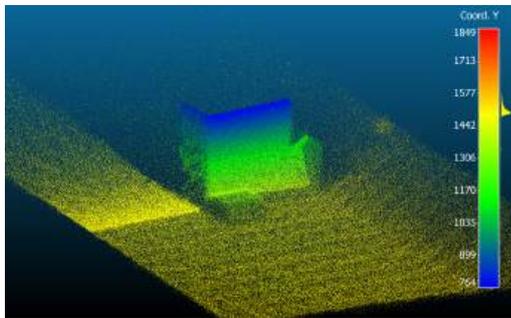
Abbildung 4.23.: Ergebnisse Szenario 1 - Scheinwerfer-Kamera-System und Intel RealSense D455 überlagert

4.4.3. Szenario 2

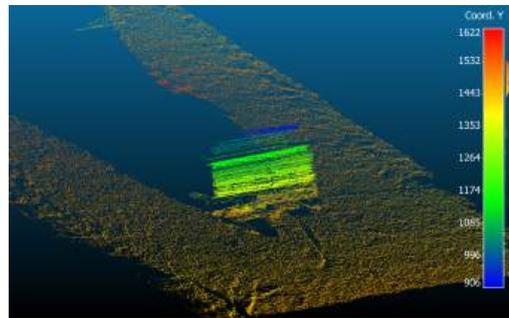
Das zweite Szenario wird untersucht, da es die Limits des Scheinwerfer-Kamera-Systems bzgl. der maximal detektierbaren Höhe und das Verhalten des Algorithmus bei mehreren Objektübergängen innerhalb eines Szenarios offenlegt. Das Szenario besteht aus einem kleinen Objekt in der Front, einem dahinter angebrachten mittleren Objekt und einem darauf platzierten oberen Objekt.

Bei Betrachtung der einzelnen Perspektiven in 4.24 ist eine ggü. den ersten beiden Szenarien verstärkte Abweichung beider Punktwolken wahrnehmbar. Für die Abweichungen ergeben sich zwei Ursachen. Die Reduktion der absoluten Höhe (vgl. 4.24e und 4.24f) und der damit einhergehenden verminderten Ausprägung des oberen Objektes resultiert aus der maximalen Detektionshöhe des Scheinwerfer-Kamera-Systems gemäß der Anbauhöhe des Scheinwerfers. Das kleine Objekt wird ebenfalls nur anhand weniger rekonstruierten Punktkoordinaten wiedergegeben. Die Ursache hierfür liegt in der geringen Höhe des Objektes, wodurch das projizierte Horizontalmuster in geringem zeitlichen Abstand zwei Objektübergänge passiert. An einem Übergang weicht das Objekt aufgrund der partiellen Projektion auf zwei Objekte von seiner eigentlichen Form ab. Daher ist die Wahrscheinlichkeit einer robusten Inferenz durch das CNN YOLOv4 an Übergängen ggü. homogenen Flächen reduziert. Des Weiteren entstehen im Falle einer korrekt inferierten Bounding Box ungewollte Artefakte bei der Extraktion der markanten Elemente (Unterkante, Mitte, Oberkante). Die Artefakte werden durch vereinzelte Verschattungen und/oder Sprüngen in der Intensität innerhalb des Auswertebereiches zur Merkmalsextraktion verursacht. Dieser Sachverhalt wird explizit in Abschnitt 4.4.5 aufgegriffen und diskutiert.

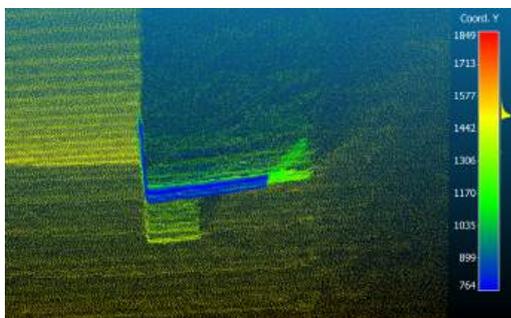
In der direkten Überlagerung beider Punktwolken in 4.25a werden die zuvor beschriebenen Unterscheidungen erneut sichtbar. Die MNND beträgt 14,7 mm bei einer Standardabweichung von 15,6 mm, was eine signifikante Erhöhung ggü. den ersten beiden Szenarien bedeutet. Insbesondere die Erhöhung der Standardabweichung ist ein Indiz für die verringerte Robustheit der 3D-Rekonstruktion des Scheinwerfer-Kamera-Systems. Innerhalb des ausgewählten Teilbereichs der 3D-Rekonstruktion variieren die Ergebnisse deutlich stärker ggü. der mittleren Distanz. Die Betrachtung



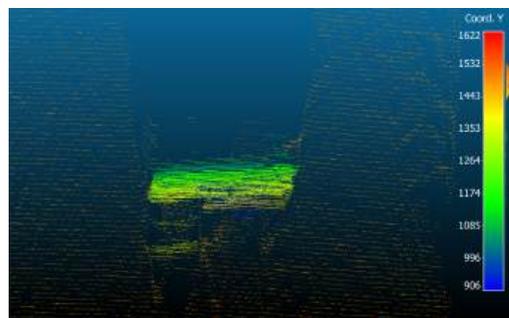
(a) Perspektive 1 - Intel RealSense D455



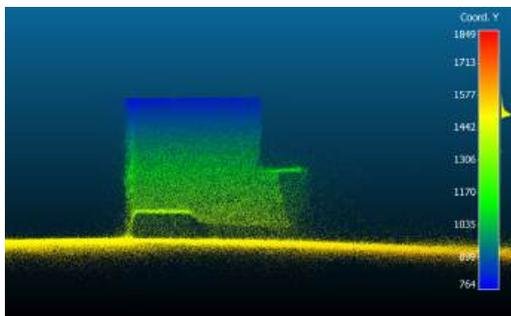
(b) Perspektive 1 - Scheinwerfer-Kamera-System



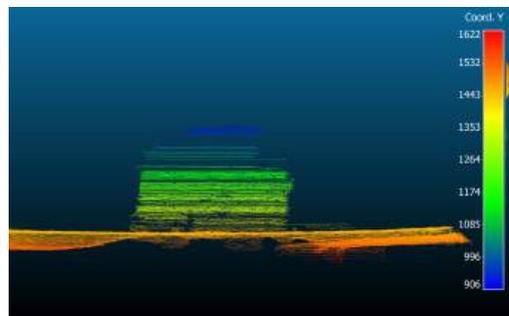
(c) Perspektive 2 - Intel RealSense D455



(d) Perspektive 2 - Scheinwerfer-Kamera-System



(e) Perspektive 3 - Intel RealSense D455



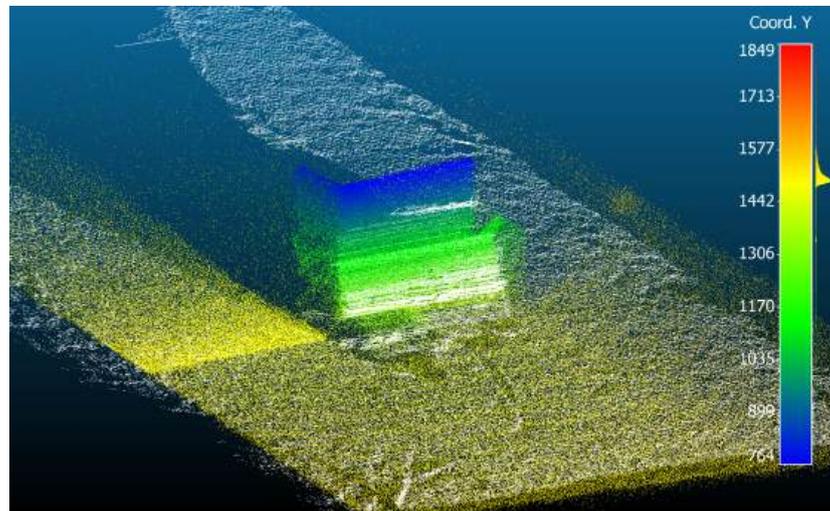
(f) Perspektive 3 - Scheinwerfer-Kamera-System

Abbildung 4.24.: Ergebnisse Szenario 2 - Scheinwerfer-Kamera-System und Intel RealSense D455 im Vergleich

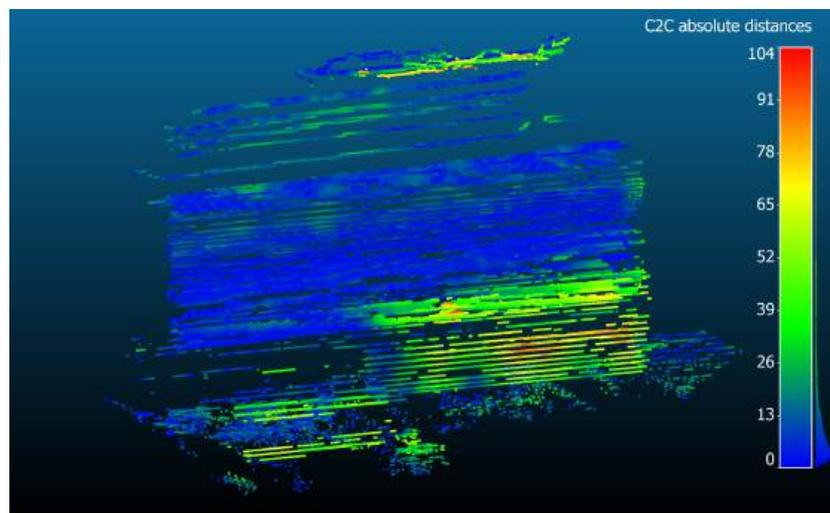
der Visualisierung der NND zwischen beiden Punktwolken bestätigt die berechneten Werte. Wie zu erwarten war, ist innerhalb des mittleren Objektes ein homogener Bereich mit konstanten Abweichungen erkennbar. Im

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

Bereich des kleinen Objektes sowie rechts davon auf der Oberfläche des mittleren Objekts sind Abweichungen von bis zu 104 mm vorhanden.



(a) Perspektive 1 - Überlagerung Intel RealSense D455 (farbig) und Scheinwerfer-Kamera-System (weiß)



(b) Detailansicht - Darstellung Nearest-Neighbor-Distance des Scheinwerfer-Kamera-Systems relativ zu dem Rekonstruktionsergebnis des Intel RealSense D455

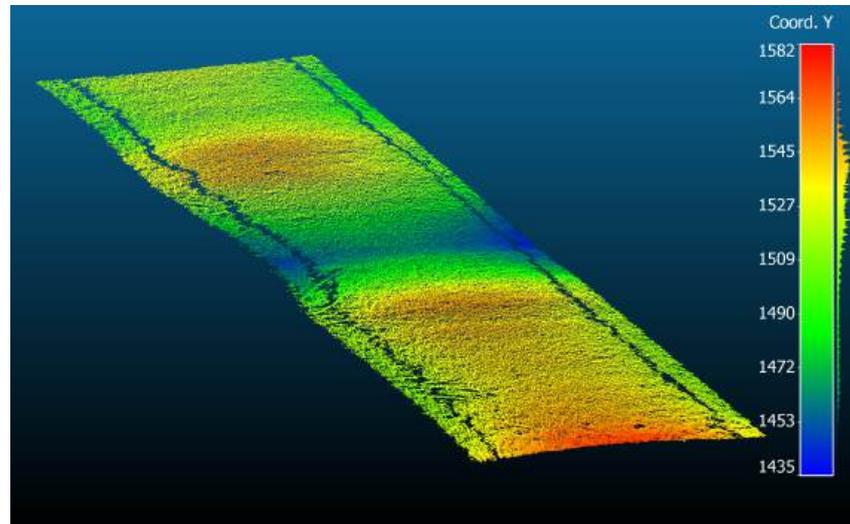
Abbildung 4.25.: Ergebnisse Szenario 2 - Scheinwerfer-Kamera-System und Intel RealSense D455 überlagert

4.4.4. Szenario 3

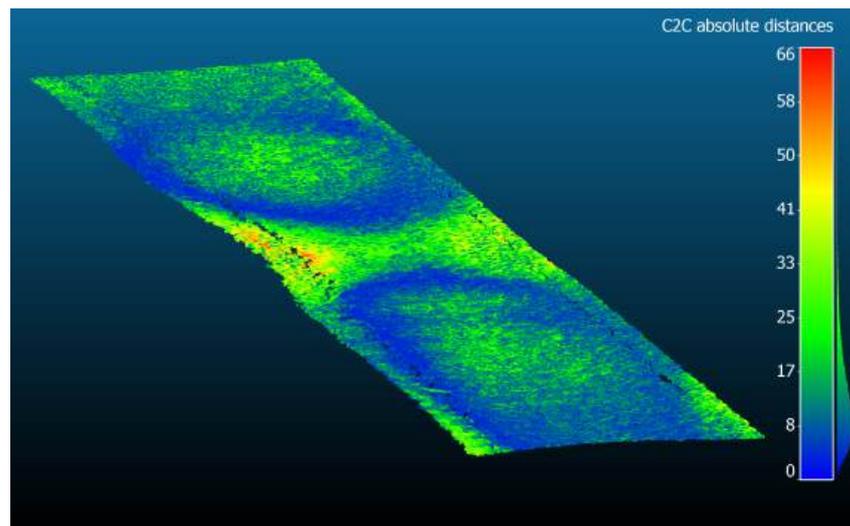
Wie bereits zuvor erwähnt, resultiert das dritte Szenario aus der Einbettung dieser Arbeit in eine wissenschaftliche Arbeit zur Bildstabilisierung projizierter Symbole aufgrund von Topographieänderungen des Fahrzeugvorfeldes. Daraus abgeleitet, wird im Rahmen dieses Szenarios die Fähigkeit zur kontinuierlichen Rekonstruktion eines Untergrundes mit entsprechender Länge betrachtet. Aufgrund der signifikant fehlerbehafteten 3D-Rekonstruktion der Punktwolke des Intel RealSense D455 in Form einer voluminösen Punktwolke bei eigentlich flacher Oberfläche, wird auf die Abbildung der Messdaten des Intel RealSense D455 für dieses Szenario verzichtet. Stattdessen zeigt [4.26a](#) die Rekonstruktion des Untergrundes durch das Scheinwerfer-Kamera-System. Über die komplette Länge des Kanals ist eine robuste Erkennung der Oberfläche ohne auffällige Ausreißer möglich. In der Mitte der Wegstrecke ist eine leichte Erhöhung des Untergrundes erkennbar, welche mit einer baulich bedingten Unebenheit des Untergrundes innerhalb des Lichtkanals korreliert. Die in den linken und rechten Randbereichen der Rekonstruktion gelagerten Fehlstellen entstammen einem bestimmten Bereich des projizierten Lichtmusters, welcher robust von dem Bildverarbeitungsalgorithmus gefiltert wird. Die Form des Lichtmusters wird in der nachgelagerten Diskussion weiter aufgegriffen und entsprechend erörtert.

Die Ermittlung der MNND zwischen Intel RealSense D455 und Scheinwerfer-Kamera-System liefert 13,2 mm mit einer Standardabweichung von 8,1 mm. Aufgrund der fehlerbehafteten 3D-Rekonstruktion der Intel RealSense D455 kann der hohe Betrag der MNND vernachlässigt werden. Bedeutender hierbei ist die adäquate Standardabweichung, welche einen Rückschluss darauf zulässt, dass kein schleichender Drift der rekonstruierten Messdaten über eine längere Messdistanz auftritt. Die Korrelation spiegelt sich ebenfalls in der Bewertung der NND in [4.26b](#) wieder.

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion



(a) Perspektive 1 - 3D-Rekonstruktion des Scheinwerfer-Kamera-Systems (farbig)



(b) Detailansicht - Darstellung Nearest-Neighbor-Distance des Scheinwerfer-Kamera-Systems relativ zu dem Rekonstruktionsergebnis des Intel RealSense D455

Abbildung 4.26.: Ergebnisse Szenario 3 - Scheinwerfer-Kamera-System und NND aus beiden Systemen ermittelt

4.4.5. Diskussion

Dieses Kapitel umfasst eine kurze Diskussion der Ergebnisse und die Einsatzfähigkeit des Systems in der Projektionsstabilisierung. Die primär lokalisierten Problemstellungen sind folgende:

- Sensibilität hinsichtlich Fehler in der Rotation der Kamera ggü. dem Fahrzeug
- Fehldetektionen an Übergängen von Objekten durch CNN YOLOv4 und den Kantendetektionsalgorithmus
- Keulenform des projizierten Lichtmusters
- Lichtreflexionen an Objekten aufgrund aktivierten Abblendlichtes

Ein weiterer statischer Fehlereinfluss entsteht bei Extraktion der Eulerwinkel, welche zur Kompensation der Rotation der Kamera ggü. dem Fahrzeug angewandt werden. Die Ausrichtung des Schachbretts weicht von der optimal senkrechten Positionierung ggü. dem Fahrzeugkoordinatensystem ab. Zum Verständnis der Auswirkung dieses Fehlers ist die Kenntnis darüber wichtig, dass ein mit Hilfe des Scheinwerfer-Kamera-System rekonstruiertes Objekt aus der Summe von rekonstruierten Koordinaten je Frame besteht. Die Rekonstruktion jedes Frames wiederum setzt sich aus den extrahierten Merkmalen, welche mit der Ebene trianguliert werden, zusammen. Um die Bewegung des Fahrzeuges zu berücksichtigen, werden die triangulierten Koordinaten in ein parallel zum Fahrzeugkoordinatensystem ausgerichtetes Kamerakoordinatensystem rotiert. Auf Basis des rotierten Kamerakoordinatensystems ist eine abschließende Addition der Koordinaten und der Fahrzeugposition möglich. Die Kamerarotation erfolgt explizit vor der Addition der Fahrzeugposition.

Die Auswirkung dieses Modells ist in 4.27 anhand eines vereinfachten Beispiels visualisiert. Der graue Kreis entspricht der Kameraposition. Die schwarzen Kreise entsprechen dem gleichen Punkt eines Objektes zu zwei verschiedenen Zeitschritten. Die unterschiedliche Distanz repräsentiert ein Fahrzeug, welches sich zwischen zwei Zeitschritten fortbewegt hat, wobei die Kamera den gleichen Punkt in beiden Frames erkennt. Zu den jeweiligen Zeitschritten ist die Differenz zwischen Kamera und Objektpunkt signifikant unterschiedlich. Werden die schwarzen Punkte im Zuge der Rotationskorrektur um die Kamera mit dem Winkel α rotiert, so liegen beide

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

auf einer Linie. Durch die abschließende Addition der relativen Positionen in z -Richtung (entspricht Addition der Fahrzeugposition), ist es möglich, dass beide Punkte auf der gleichen Koordinate landen. Wird die Rotation jedoch mit einem zusätzlichen Fehlerwinkel ϵ angewendet, ist dies nicht der Fall. Eine Addition der Fahrzeugposition, welche weiterhin ausschließlich in z -Richtung vorgesehen ist, wird niemals zu zwei überlagerten Punkten führen können. Dieser Effekt zeichnet sich in der 3D-Rekonstruktion eines Szenarios dadurch aus, dass Objektkonturen, die senkrecht ggü. dem Untergrund ausgerichtet sind, einen verzerrten Verlauf einnehmen. Dies hat zur Folge, dass weder die Objekthöhe noch die Länge und Breite des Objektes korrekt rekonstruiert werden.

Die Kompensation der Fehler in den Eulerwinkeln zwischen Kamera und Fahrzeug wird erneut empirisch durch Variation der Eulerwinkel ermittelt. Im Vergleich zu dem Rekonstruktionsergebnis der Intel RealSense D455 werden die Winkel so verändert, dass senkrechte Objektkanten analog der realen Erscheinung dargestellt werden. Auch hier zeigt sich, dass die Korrektur für ein kalibriertes Scheinwerfer-Kamera-System einmalig durchzuführen ist und für die komplette Messfahrt verschiedener Szenarien gültig bleibt. Die Rotation zwischen Kamera und Fahrzeug der Messfahrten wird um die x -Achse mit dem Winkel $-0,01$ rad und um die y -Achse mit dem Winkel $-0,05$ rad korrigiert. Die initiale Kompensation der Fehlstellungen ist mit Hilfe eines optimierten Kalibrationsobjektes denkbar und wird später vertieft.

Insbesondere im zweiten Szenario sind Schwächen im Rekonstruktionsergebnis des Scheinwerfer-Kamera-Systems erkennbar. Ein Grund hierfür ist die komplexe Anordnung der Objekte, was zu Fehldetektionen durch das CNN YOLOv4 führt. In 4.28 werden zwei dieser Fehldetektionen näher betrachtet. An Übergängen von Objekten, wie sie im zweiten Szenario mehrfach vorkommen, treten fehlerhaft platzierte Bounding Boxen innerhalb des Frames auf. Explizit ist dieses Verhalten in 4.28a dargestellt. Eine Merkmalsextraktion anhand dieser Bounding Box führt einerseits aufgrund der inkorrekten Position zu Fehlern, andererseits wird das projizierte Horizontalmuster partiell unterbrochen. Die Extraktion der Unterkante könnte bspw. zu Positionen von Merkmalen führen, welche nicht die tatsächliche Unterkante des Musters repräsentieren.

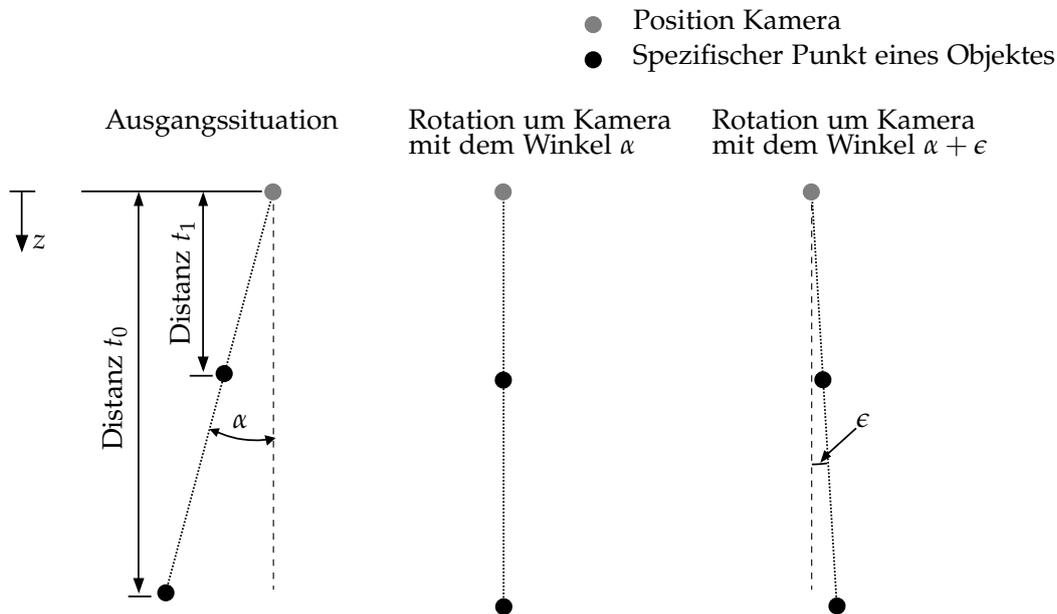
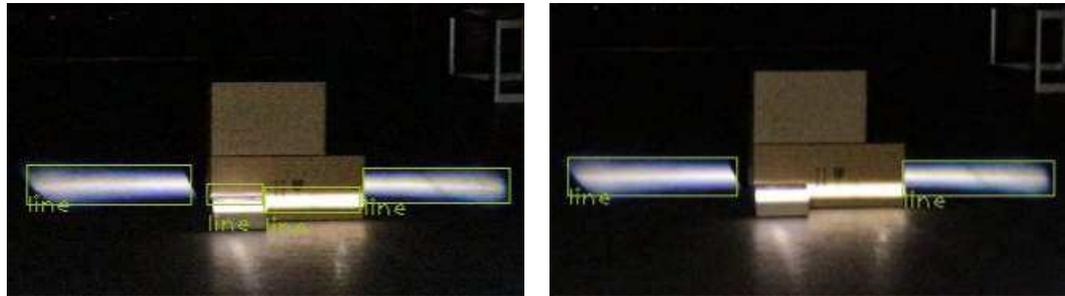


Abbildung 4.27.: Schematische 1D-Darstellung der Auswirkung eines Fehlers in den Eulerwinkel zur Kompensation der Rotation zwischen Kamera und Fahrzeug

Alternativ dazu treten Fälle auf, bei denen das CNN nicht alle möglichen Bereiche des Horizontalmusters inferiert. Ein Beispiel hierzu kann [4.28b](#) entnommen werden. In dieser Darstellung werden anstatt vier Bounding Boxen lediglich zwei Bounding Boxen ausgegeben. Dies führt zu einem Verlust an 3D-Informationen im Bereich des Objektes. Unabhängig von den beiden Aspekten ist die Inferenz der Abmaße und der exakten Position der Bounding Box ebenfalls von Relevanz. Durch zu klein geschätzte Bounding Boxen wird z. B. die maximal detektierbare Breite des Scheinwerfer-Kamera-Systems unnötig eingeschränkt. Grundsätzlich sind weitere Untersuchungen im Rahmen nachfolgender Arbeiten in Bezug auf spezifische CNNs ratsam, welche die Performance zur Detektion dieses spezifischen Musters weiter verbessern. Da die Hauptaufgabe dieser Arbeit nicht die Rekonstruktion von beliebig komplexen Objekten ist, sondern vielmehr der Fokus auf die Rekonstruktion von Untergründen des Fahrzeugvorfeldes gelegt wird, ist die Performance von YOLOv4 im Rahmen dieser Erstuntersuchung ausreichend.

Eine weitere Schwachstelle des Scheinwerfer-Kamera-Systems ist die tatsächli-

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion



(a) YOLOv4 Fehldetektion an Objektübergang

(b) YOLOv4 Fehldetektion - fehlende Bounding Box

Abbildung 4.28.: Zwei auftretende Fehldetektionen des YOLO-Algorithmus'

che Gestalt des projizierten Horizontalmusters ggü. der Modellvorstellung. Die Spezifikation des verwendeten μ LED-Scheinwerfers ist ohne die Berücksichtigung der Anforderungen eines möglichen Scheinwerfer-Kamera-System entstanden. Dadurch ist die Abbildungstreue des optischen Systems hinsichtlich einer möglichst geradlinigen Projektion mit maximalem Gradienten nicht optimal. Wie in 4.29 gezeigt, entspricht das projizierte Horizontalmuster mehr einer Keule als einem exakten Rechteck. Als Keule wird die Tendenz zur Verbreiterung des Musters in den Randbereichen bezeichnet. Aufgrund der Keulenform weicht das tatsächliche Muster von der Modellierung einer Ebene zumindest für die Unterkante und die Oberkante ab. Vielmehr entspräche die Modellierung in Form einer Bahnkurve der realen Form des Musters. Die Verwendung der maximalen Intensität als Merkmal ist im Vergleich zur Unterkante und zur Oberkante deutlich geradliniger, wodurch die Abweichung zwischen Modell und realem Muster geringer ist. Das angewandte Gütekriterium zur Auswahl des besten Merkmals stellt sicher, dass explizit in Situationen, in welchen die Keulenform stark ausgeprägt ist (z. B. Projektion auf Untergrund), die Mitte als Kriterium der Wahl Anwendung findet.

Ein weiterer Punkt ist der Reifegrad des prototypisch aufgebauten μ LED-Scheinwerfers. Das projizierte Lichtmuster ist teilweise von Pixelfehlern innerhalb des projizierten Musters betroffen. Diese führen zu partiell verdunkelten Bereichen mit reduziertem Gradienten und sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einzelne Ausfälle im LED-Array des verbauten Chips zurückführbar. Abschließend seien die durch das optische System verur-

sachten Farbsäume rund um das projizierte Muster zu nennen. Diese sind unter anderem eine Ursache für die Unterscheidung in der Lokalisierung eines Kantenmerkmals zwischen dem Kalibrationsobjekt und der Lokalisierung im Rahmen einer 3D-Rekonstruktion. Nach der aktuellen Einschätzung sind alle genannten Schwachstellen des Lichtmusters in erster Näherung bei entsprechender Spezifikation technisch optimierbar.

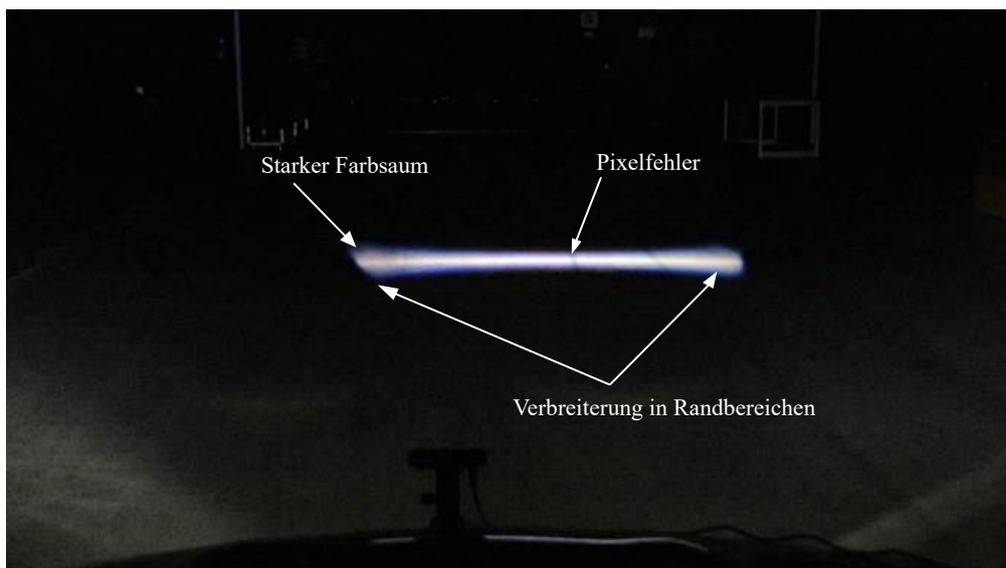


Abbildung 4.29.: Abweichungen des projizierten Horizontalmusters ggü. einem idealen Rechteck

Bei genauer Betrachtung der Referenz-Punktwolke des Intel RealSense D455 ist hauptsächlich aus der zweiten Perspektive der jeweiligen Szenarien erkennbar, dass die Frontfläche eines Objektes durch eine voluminöse Punktwolke abgebildet wird. Der Grund für diese Beobachtung sind Fehler in der Synchronität der Punktwolke eines spezifischen Frames und der korrespondierenden Fahrzeugposition. Dies hat zur Folge, dass die Punktwolken ggü. der Startposition des Fahrzeuges mit einem toleranzbehafteten Wert verschoben werden. Durch nachträgliche Iterationsschritte werden die Punktwolken den Fahrzeugpositionen zugewiesen, aus denen eine bestmögliche Überdeckung der Punktwolken resultiert. Auch die Synchronität des Scheinwerfer-Kamera-System und der Fahrzeugdaten unterliegt einer Toleranz, welche jedoch deutlich geringer ist. Die auftre-

4. Strukturiertes Licht zur Fahrbahnrekonstruktion

tenden Toleranzen sind klein genug, dass weiterhin eine aussagekräftige Bewertung der Performance des Scheinwerfer-Kamera-Systems in Relation zum Referenzsystem des Intel RealSense D455 möglich ist.

Abschließend muss erwähnt werden, dass die Aufnahmen zur Bewertung der Lost Cargo Detektion ohne Abblendlicht durchgeführt wurden. Dies hat den Hintergrund, dass es bei stark reflektiven Oberflächen mit senkrechter Ausrichtung zur Kamera und einer geringen Distanz zum Objekt zu einer Übersättigung des Kamerabildes kommen kann. In Bild 4.30 wird dies an einem Extrembeispiel visualisiert, wo in den rot markierten Bereichen das Abblendlicht das projizierte Streifenmuster vollständig überstrahlt. Auf dem Untergrund hingegen ist das projizierte Muster weiterhin klar erkennbar (siehe grüne Markierungen), weshalb die Reflexion durch das Abblendlicht an Objekten keine Auswirkungen für die reine Projektionsstabilisierung hat.



Abbildung 4.30.: Reflexionen an Objekten in Richtung der Kamera aufgrund Abblendlicht des Scheinwerfers

5. Nick- und Wankprädiktion

Durch die langen Signalübertragungswege der Messwerte des Inertialsensors und der notwendigen Datenverarbeitung ist nur eine verzögerte Reaktion auf die auf diese Weise erfassten Bewegungen des Fahrzeugs möglich. Da im Vergleich zu Bildstabilisierungssystemen wie beispielsweise in der Kamera keine Verzögerung oder Zwischenspeicherung von Frames möglich ist, sondern das projizierte Bild direkt durch die vorliegenden Fahrzeugbewegungen verschoben wird, sorgt jede Verzögerung für eine Entkopplung der Stabilisierungsmaßnahmen von der realen Dynamik. Zusätzlich sind die Rohmesswerte des Sensors nicht direkt für eine Projektionsanpassung verwendbar, sondern müssen erst durch Berechnungen in entsprechende Verzerrungen, Verschiebungen und Transformationen umgewandelt werden, welche zusätzliche Zeit benötigen. Der letzte Faktor, der zur Latenz beiträgt, ist das interne Framebuffering im Scheinwerfer-ECU, welches auf Basis der Wiederholrate von 60 Hz zu einer Verzögerung von 16,7(6) ms führt. Diese 3 Komponenten sind in Abbildung 5.1 aufgezeigt.

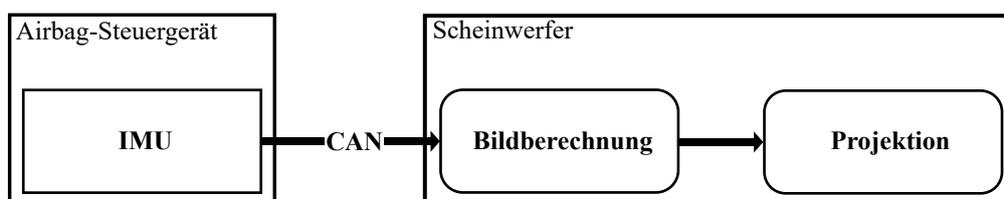


Abbildung 5.1.: Signalkette der Bildgenerierung

Für eine Stabilisierung der Symbole muss diese Bewegung schnell genug erfasst und durch das ausgestrahlte Lichtbild kompensiert werden. Nach den Berechnungen in Abschnitt 3.3.4, muss in hochdynamischen Situationen bereits 10 ms nach dem Start der Bewegung mit der Gegensteuerung begonnen werden, wobei das Delta zum tatsächlichen Nickwinkel nicht

5. Nick- und Wankprädiktion

größer als $0,1^\circ$ sein soll. Damit trotz dieser Latenzen das System nicht rein reaktiv arbeitet, ist es notwendig, die zukünftigen Bewegungen des Fahrzeugs im Voraus zu bestimmen. Dies wirkt im ersten Moment unintuitiv, da die Bewegungen der Fahrzeugkarosserie von äußeren Kräften abhängen, welche durch den Schlupf der Räder, Straßenunebenheiten oder sogar den Wind induziert werden. In relativ kurzen Betrachtungszeiträumen lassen sich jedoch aus der bisherigen Bewegung Rückschlüsse auf die weiteren Bewegungen schließen. Durch die Eigenschaften des Fahrzeugfahrwerks und seiner Dämpfungscharakteristik ist die Rotation der Fahrzeugkarosserie in ihrem Verlauf nach der initialen Anregung vordefiniert, so lange keine weitere starke Anregung erfolgt. Dies gilt ebenso für die Rotationszentren, welche konstruktionsmäßig positionsfest sind. Dadurch ist es möglich, nach dem Beginn einer Bewegung auf den folgenden Verlauf zu schließen. Die Positionierung der Prädiktion in der Gesamtsystemsgrafik aus dem Einleitungskapitel ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

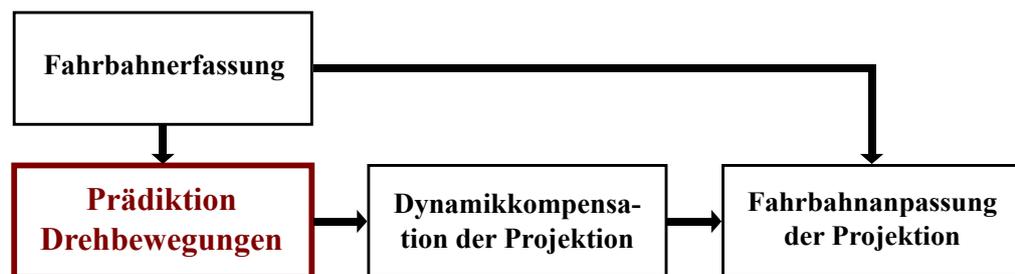


Abbildung 5.2.: Position der Prädiktion (rot) im Gesamtsystem

In vorherigen Arbeiten [Cramer, 2019] ist die Qualität der Ergebnisse von Prädiktionssystemen für verschiedene Modelltiefen der Fahrzeugdynamik untersucht worden. Dabei verwendete man unterschiedliche Fahrdynamikmodelle, um mithilfe der im Fahrzeug vorhandenen Sensorik die Kräfte und Momente im Fahrzeug zu berechnen und somit die künftigen Nick- und Wankbewegungen entsprechend den Modellen präzisieren zu können.

Zuerst als reines Vergleichs- und Absicherungsverfahren gedacht, wurde eine einfache Lineare Regression antrainiert, die als Eingangsgrößen die Messwerte aus den Beschleunigungs-, Drehraten- und Niveausensoren verwendet, um bis zu einer festgelegten Zeit in der Zukunft (10-40 ms) den Drehwinkel um die y-Achse, also den Nickwinkel zu berechnen. Die

Ergebnisse für eine Prädiktion des Fahrzeugnickwinkels sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

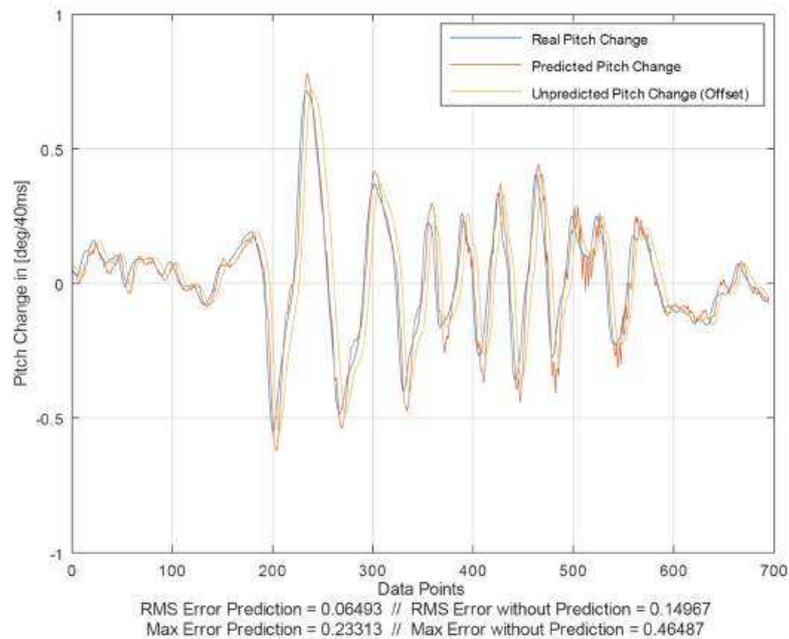


Abbildung 5.3.: Ergebnisse der Nickwinkelprädiktion nach Cramer und Schmidt [Cramer, 2019]

Die Parameter des Modells werden hierbei über den Trainingsdatensatz so angepasst, dass als Ground Truth die echten Messwerte des Gyro-Sensors integriert werden.

In den folgenden Abschnitten soll die Adaption und Implementation dieses Konzepts erörtert und abschließend die Integration in die Bildstabilisierung diskutiert werden.

5.1. Voraussetzungen

Für die Prädiktion sind Informationen über verschiedene Zustände des Fahrzeugs als Eingangsgrößen notwendig. Der wichtigste Wert dabei ist die

5. Nick- und Wankprädiktion

Größe selbst, welche prädiziert werden soll. Diese sind die Drehraten des Fahrzeugs, welche durch den eingebauten Inertialsensor bestimmt werden. Diese Sensoren liefern außerdem zusätzlich die Beschleunigungswerte, welche wie in Kapitel 6 näher beleuchtet ebenfalls einen direkten Einfluss auf das Nick- und Wankverhalten des Fahrzeugs haben.

In [Cramer, 2019] werden weitere Eingabegrößen in das System integriert, welche entweder wichtige Größen der Fahrzeugdynamik darstellen oder zusätzliche Informationen über die aktuelle Fahrsituation liefern. Dabei werden nur 10 Eingangssignale betrachtet, bestehend aus der Beschleunigung und Drehrate in jeweils allen drei Raumrichtungen sowie den Niveauhöhen aus den Achssensoren an allen vier Radpositionen. Ergänzend, falls verfügbar, werden Informationen über die Straßenunebenheiten vom Road-Surface-Scan hinzugezogen.

Dieser Aufbau wird nun überarbeitet und der Architektur der Projektionsstabilisierung angeglichen. So sollen die Achssensoren nicht weiterverwendet werden und als Erweiterung werden die Eingänge um weitere Eingangssignale ergänzt, womit sich folgende Signalübersicht ergibt:

- Drehrate im Fahrzeugkoordinatensystem, jeweils für die x-, y- und z-Achse (3)
- Drehratenbeschleunigung im Fahrzeugkoordinatensystem, jeweils für x-, y- und z-Achse (3)
- Beschleunigung im Fahrzeugkoordinatensystem, jeweils für x-, y- und z-Achse (3)
- Bremsmomente an allen vier Rädern (4)
- Geschwindigkeit in x- und y-Richtung im Straßenkoordinatensystem (2)
- Drehzahl aller vier Räder (4)
- Lenkwinkel und Lenkgeschwindigkeit (2)
- Fahrbahnhöhe auf Fahrspurtrajektorie in 5 Metern Entfernung (2)

Weiterhin werden Informationen über die Straßenunebenheiten, die bisher über den Road Surface Scan erfolgten, durch die Werte der aktiven Triangulation ersetzt. Zu beachten ist, dass diese Werte nicht zu jeder Zeit und in gleicher Qualität zur Verfügung stehen. Details zu den Einschränkungen können Kapitel 4 entnommen werden.

5.2. Grundlagen

Um mithilfe der Eingangsgrößen den gewünschten Nick- und Wankwinkel präzisieren zu können, muss ein mathematischer Zusammenhang zwischen diesen aufgestellt werden. Diese Nachbildung erfolgt über das maschinelle Lernen, da die Gesetzmäßigkeiten und Wechselwirkungen im Fahrzeug nicht vollständig mathematisch bekannt sind und nicht alle Einflussfaktoren bestimmt und gemessen werden können.

Da im Nachgang die tatsächliche Bewegung des Fahrzeugs über die verbaute Inertialsensorik erfasst wird, kann ein Verfahren des überwachten Lernens angewandt werden. Dabei ist der vorliegende Fall ein Regressionsproblem, welches durch bekannte Verfahren wie lineare Regression und Neuronale Netze gelöst werden kann. Die lineare Regression, welche in der Vorarbeit verwendet wurde, soll deshalb nun vorgestellt werden.

5.2.1. Lineare und nichtlineare Regression

Die lineare Regression nutzt Variablen als Eingangsgrößen, welche einen wahrscheinlichen Einfluss auf den gesuchten Wert haben, und versucht mit diesen einen passenden linearen Zusammenhang zu finden. Die Eingangsgrößen in diesem Fall sind, wie im Abschnitt zuvor dargestellt, beispielsweise die bisherige Drehrate, welche durch die Trägheit der Fahrzeugmasse immer einen Einfluss auf die zukünftige Drehrate des Fahrzeugs aufweist. Wie sich dieser Zusammenhang quantitativ gestaltet, ist abhängig vom jeweiligen Fahrzeugfahrwerk und weiteren Einflussfaktoren wie Geschwindigkeit und Fahrbahn.

Je mehr Messungen über diese und weitere Größen vorhanden sind, desto stärker kann die Regression zwischen verschiedenen Fällen unterscheiden und mitunter eine bessere Prädiktion liefern. Eine einfache multiple lineare Regression mit mehreren Eingangsgrößen ist in nachfolgender Gleichung dargestellt:

$$y = \theta_0 + x_1\theta_1 + x_2\theta_2 + \dots \quad (5.1)$$

Der Wert y ist dabei linear mit einem Faktor θ gewichtet, von den Eingangsgrößen x abhängig. Die Faktoren x , Regressionskoeffizienten genannt,

5. Nick- und Wankprädiktion

werden im Trainingsschritt ermittelt, für den Daten mit y und den dazugehörigen Eingangsgrößen x vorhanden sind. Hierzu werden die Koeffizienten θ so bestimmt, dass der quadratische Fehler zwischen berechnetem und tatsächlichem y minimiert wird. Um diesen Idealwert zu bestimmen kann beispielsweise die Normalgleichung verwendet werden.

Um komplexere Zusammenhänge darzustellen, bei denen der Prädiktionwert nicht linear vom Eingang abhängt, wird dieses Modell zur nichtlinearen Regression erweitert. Hierbei können beliebige Eingangsgrößen zu Variablen zweiter, dritter oder höherer Ordnung kombiniert werden. Daraus ergibt sich beispielsweise folgende multiple nichtlineare Regression:

$$y = \theta_0 + x_1\theta_1 + x_2\theta_2 + x_1^2\theta_3 + x_1x_2\theta_4 + x_5^2\theta_5 \quad (5.2)$$

5.2.2. Funktionsweise

In 5.4 ist der Ansatz der Prädiktion mit zwei Eingangsgrößen beispielhaft für die Nickprädiktion dargestellt.

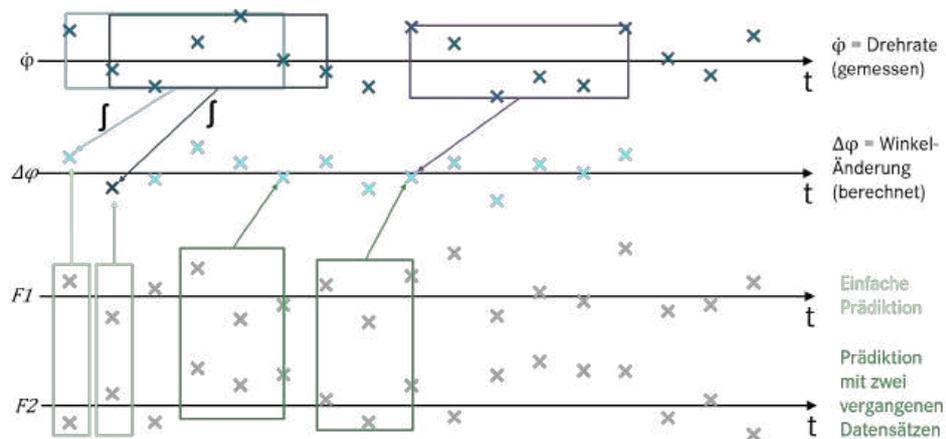


Abbildung 5.4.: Vereinfachtes Funktionsprinzip der Prädiktion der Nickwinkeländerung $\delta\psi$. Anhand der Eingangssignale $F1$ und $F2$ wird zum Zeitpunkt $t = 0$ die Nickwinkeländerung des Fahrzeugs bis zum Zeitpunkt $t = 50$ ms prädiziert.

In hellgrün dargestellt werden dabei nur die Eingangssignale zu $t = 0$ beachtet. In dunkelgrün ist eine Prädiktion mit Pufferung dargestellt, bei der zuvor abgespeicherte Eingangssignale von vorherigen Abtastzeitpunkten hinzugezogen werden. In diesem Fall sind das nur zwei vergangene Messwerte bis $t = -20$ ms, was aber beliebig erweitert werden kann. In diesem Fall sind alle weiteren Vergangenheitswerte jeweils zusätzliche einzelne Eingangsgrößen.

Anhand des vortrainierten Modells wird mit diesen Messwerten nun die in den nächsten 50 ms bis $t = 50$ ms erfolgende Nickwinkeländerung prädiziert. Die tatsächlich stattgefundenen Nickwinkeländerung kann erst nach 50 ms zu $t = 50$ ms über den Drehratensensor ermittelt werden. Hierzu werden die Drehraten $\dot{\psi}$ von $t = 0$ bis $t = 50$ ms aufintegriert. Die Differenz zwischen diesem Wert und der Nickwinkeländerung, prädiziert durch die Anwendung des Modells, ergibt unseren Prädiktionsfehler, welcher für das weitere Training bzw. ein Update des Modells verwendet werden kann.

Die Informationen des Inertialsensors liegen im Fahrzeug als 100 Hz Signal an, was einen Datenpunkt alle 10 ms bedeutet. Bei den weiteren Sensoren kann diese hohe Datenrate allerdings nicht erreicht werden, so besitzen diese eine Datenrate von 50 Hz mit neuen Messdaten alle 20 ms. Um diese Diskrepanz zu überbrücken, muss die Prädiktion auf eine der beiden Datenraten festgesetzt werden. Das Prädiktionssystem wird auf 100 Hz festgesetzt, liefert also alle 10 ms eine neue Prädiktion. Für die fehlenden Daten der Sensoren mit einer Datenrate von 50 Hz werden dabei die letzten jeweiligen Messwerte verwendet. Eine Interpolation würde zwar realistischere Werte liefern, ist jedoch bei der späteren Online-Prädiktion im Fahrzeug nicht berechenbar.

5.3. Auswahl des Prädiktionsverfahrens

Schmidt und Cramer [Cramer, 2019] verwendeten eine reguläre lineare Regression für das Erlernen der Koeffizienten und die anschließende Prädiktion der Nickwinkel. In diesem Abschnitt soll es daher darum gehen, diesen Ansatz durch robustere Lernverfahren zu ersetzen, die zeitgleich

eventuell in der Lage sind, eine genauere Abbildung des Fahrdynamikmodells zu erstellen.

Hierfür wird die ElasticNet Regression als variable Regressionsarchitektur herangezogen sowie ein einfaches Neuronales Netz als Vergleichsbasis aufgebaut. In beiden wird die Prädiktion entsprechend den Abschnitten 5.1 und 5.2 mit denselben Eingangsgrößen, Prädiktionswerten und Datensätzen aufgestellt. Abschließend werden beide Ansätze anhand einer kompakten Testmessung verglichen und unter den Aspekten des Rechenaufwands und der Genauigkeit verglichen. Auf Basis dieser Werte wird eines der beiden Verfahren für die weiteren Betrachtungen in diesem Kapitel ausgewählt.

5.3.1. ElasticNet Regression

Um das Gewicht einzelner Parameter auszugleichen wird eine Regularisierung angewendet. Der Hintergrund hierzu ist, ein mögliches Overfitting auf den Trainingsdatensatz zu verringern und damit gleichzeitig die Komplexität des Modells möglichst gering und damit die Robustheit hochzuhalten. Vor allem im vorliegenden Fall, bei dem direkt die rauschbehafteten Sensorwerte verwendet werden, ist dieser Fehler besonders prägnant. In Abbildung 5.6 werden die Fehler einer ElasticNet Regression für den Trainings- und den Validierungsdatensatz dargestellt. Die deutlich schlechtere Performance bei der Validierung lässt auf ein Overfitting des Modells schließen.

In der normalen linearen Regression entspricht die verwendete Kostenfunktion der Verlustfunktion und wird über die Anzahl der verwendeten Datenpunkte m und ihrem zu prädizierenden Wertevektor Y berechnet zu

$$L = \frac{1}{2m} \sum (h(X) - Y)^2 \quad (5.3)$$

wobei die Prädiktionsfunktion

$$h(X) = \Theta X^T \quad (5.4)$$

dem Produkt des Parametervektor Θ bestehend aus den einzelnen Modellkoeffizienten mit dem Eingangsvektor X entspricht.

Bei der Regularisierung wird diese Kostenfunktion um eine Regularisierungskomponente erweitert. Bei der L₁- oder Lasso-Regularisierung entspricht das der L₁ Norm des Parametervektors, wohingegen bei der L₂- oder Ridge-Regression die L₂-Norm verwendet wird. Ist das Modell bereits ausgearbeitet und bekannt, dass alle Parameter benötigt werden, so ist ein Einsatz der L₂-Regularisierung sinnvoller. Da nicht vollständig bekannt ist, welche Parameter wirklich eine Rolle für die zuverlässige Prädiktion spielen, wird die ElasticNet Regression verwendet, welche eine Mischung aus L₁ und L₂ Regularisierung darstellt, bei der beide zeitgleich angewandt werden. Hierbei wird ein Gewichtungsfaktor α verwendet, welcher zwischen 0 und 1 liegt und das relative Gewicht der L₁ und L₂ Regularisierung festlegt. Ergänzt wird der Regularisierungsanteil durch den Hyperparameter λ , welcher das Gewicht des Regularisierungsanteils im Vergleich zur Verlustfunktion angibt.

Zusammengefasst ergibt sich die Kostenfunktion der ElasticNet-Regression damit zu

$$J = \frac{1}{2m} \sum (h(X) - Y)^2 + \lambda \left(\frac{1-\alpha}{2} \sum \Theta_j^2 + \alpha \sum |\Theta_j| \right) \quad (5.5)$$

und wird als Grundlage für die Untersuchungen an der Nick- und Wankprädiktion verwendet.

5.3.2. Neuronales Netz

Um die Prädiktionsqualität bei noch komplexeren Modellen zu untersuchen, werden weiterhin Neuronale Netze betrachtet.

Verwendet für die Untersuchung wurde TensorFlow unter der Python-Bibliothek Keras. Dabei wurde das Modell aus drei sequenziellen Schichten mit Leaky ReLU als Aktivierungsfunktion sowie anschließender Batch-Normalisierung aufgebaut.

Für eine Regularisierung entsprechend der ElasticNet Regression wird eine zusätzliche Dropout Schicht eingeführt. Diese sorgt dafür, dass zufällig eine bestimmte Prozentzahl der Einträge im Input-Tensor auf 0 gesetzt werden.

5. Nick- und Wankprädiktion

Hierdurch werden die entsprechenden Neuronen deaktiviert und das Modell deutlich vereinfacht. In Abbildung 5.5 ist der sequentielle Aufbau des für den Vergleich herangezogenen Netzwerks dargestellt.

```
model=keras.models.Sequential([  
  
    keras.layers.Dense(512, input_dim = X_train.shape[1]),  
    keras.layers.LeakyReLU(),  
    keras.layers.BatchNormalization(),  
    keras.layers.Dropout(0.2),  
  
    keras.layers.Dense(units=256),  
    keras.layers.LeakyReLU(),  
    keras.layers.BatchNormalization(),  
    keras.layers.Dropout(0.1),  
  
    keras.layers.Dense(units=128),  
    keras.layers.LeakyReLU(),  
    keras.layers.Dense(units=1, activation="linear"),  
])
```

Abbildung 5.5.: Aufbau des verwendeten Netzwerks in Keras

5.3.3. Ergebnisse

Um das Neuronale Netzwerk und die Regression zu vergleichen, wurde eine Testmessung in einem Fahrzeug der Baureihe 223 aufgezeichnet.

Für das Training der ElasticNet Regression wurde Gradient Descent verwendet. Es liefert leicht höhere Fehler als die Normalengleichung, ist aber bei der relativ hohen Zahl an Features schneller. Für einen Speed-Up wurde dabei eine Mini-Batch Regression mit einer Batch-Size von 1000 ausgewählt.

In Grafik 5.6 ist der Fehler während des Lernprozesses für den Trainings- und Cross-Validierungs-Datensatz aufgetragen.

Der Fehler konvergiert gegen $5e^{-5}$.

Im Vergleich hierzu wurde das Training des Neuronalen Netzes mit 1024 Datenpunkten pro Batch, sowie einem Validierungsgrad von 20 % durchgeführt. In 5.7 ist der Fehler während dem Lernverlauf aufgetragen.

5.3. Auswahl des Prädiktionsverfahrens

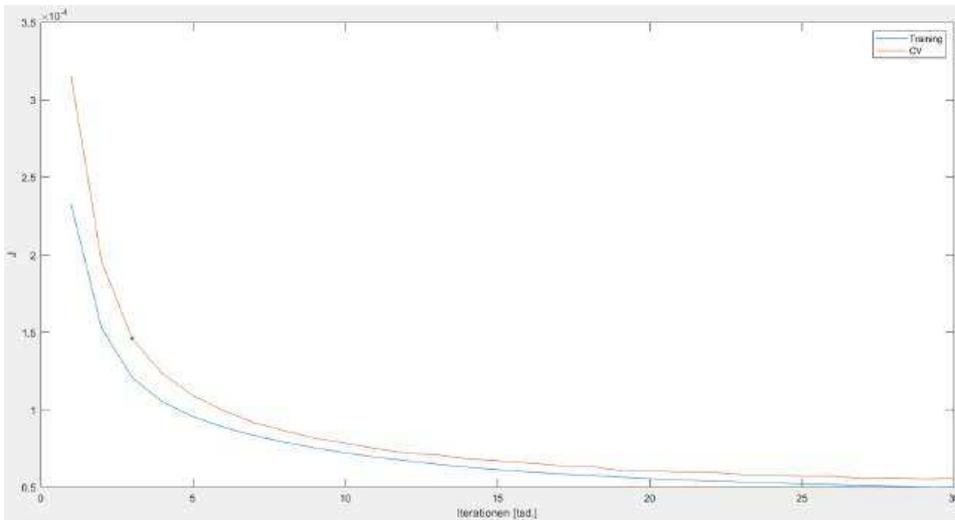


Abbildung 5.6.: Loss der ElasticNet Regression in Abhängigkeit der Iterationen

Während des Lernprozesses konvergiert der Fehler gegen $\approx 0,0038$. Trotz der Möglichkeit, im Neuronalen Netz deutlich komplexere Modelle mit vielfältigeren Verbindungen aufzubauen, zeigt sich, dass der Fehler weit über demjenigen der Regression verweilt. Von diesen Ergebnissen ausgehend, wird im weiteren Verlauf für die Prädiktion der Ansatz der Regression weiterverfolgt.

Weiterhin zeigt sich, dass die besten Ergebnisse bei der ElasticNet-Regression für Werte von $\alpha \approx 0$ erreicht werden. Dies bedeutet, dass das Problem sehr gut als reines Ridge Regression Modell handhabbar ist. Dieses Ergebnis ist gut nachvollziehbar, da die L_1 -Regularisierung typischerweise Schwächen bei vielen miteinander korrelierenden Features aufweist. Weiterhin hat die Ridge Regression kalkulatorische Vorteile gegenüber der Lasso-Regression und kann mithilfe der klassischen Normalengleichung oder des Gradient Descents gelöst werden. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf die Ridge-Regression als Lösungsmodell für unser Prädiktionsproblem verwendet.

5. Nick- und Wankprädiktion

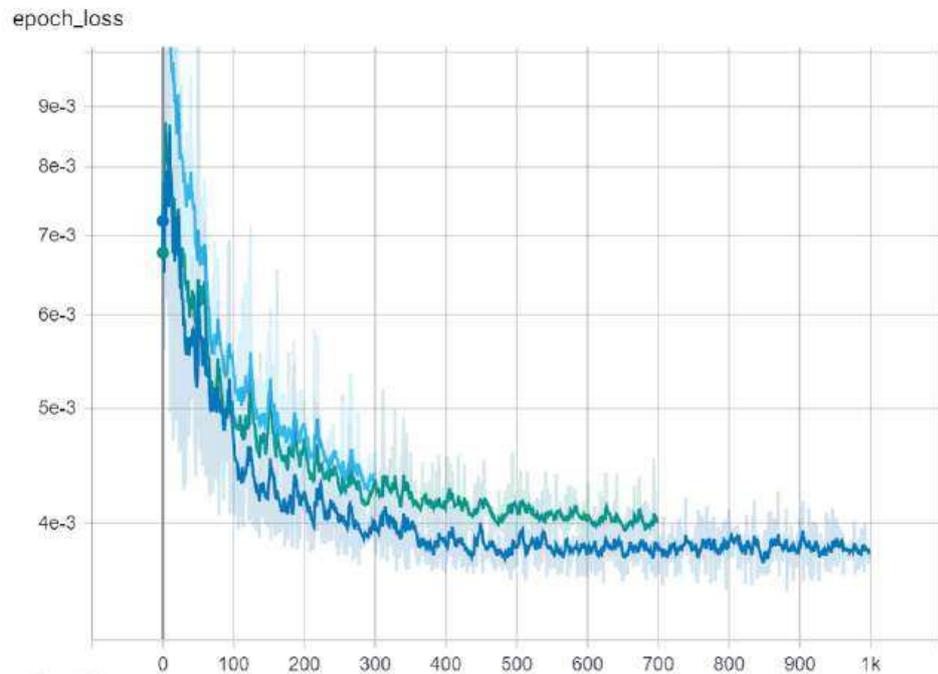


Abbildung 5.7.: Loss des Neuronalen Netzwerks in Abhängigkeit der Iterationen

5.4. Prädiktionssystem

Nachdem die vorhandenen Eingangssignale definiert und das zu verwendende Lernverfahren ausgewählt wurden, kann nun das System vollständig entworfen werden. Im ersten Schritt wird die Konfiguration aufgebaut, innerhalb welcher die Prädiktion arbeiten wird. Anschließend wird die Gesamtstruktur des Prädiktionssystems mit ihren Einzelkomponenten vorgestellt, welche in das Gesamtsystem der Projektionsstabilisierung integriert wird.

5.4.1. Konfiguration

Die Prädiktion kann für unterschiedliche Eingangs- und Ausgangswerte spezifiziert werden, je nach zur Verfügung stehender Plattform und

gewünschtem Einsatzzweck. Im Zusammenhang mit dem Einsatz für die Projektionsstabilisierung werden deshalb die endgültigen Eingangssignale spezifiziert, sowie untersucht, welchen Einfluss die Verwendung vergangener Messpunkte auf die Prädiktionsqualität aufweist. Abschließend wird der Prädiktionsfehler für verschiedene Prädiktionszeiten betrachtet und die endgültige Konfiguration des Prädiktionssystems festgelegt.

5.4.2. Eingänge

Um die Komplexität des Modells zu minimieren und damit die benötigte Rechenleistung zu reduzieren, wird untersucht, welche der Eingangswerte des Systems nicht benötigt werden. Das Ziel ist die Eliminierung unbedeutender Parameter, welche nur einen kleinen oder sogar gar keinen Einfluss auf die Prädiktionsqualität aufweisen. So ist die Information über die Längs- und Quergeschwindigkeit des Fahrzeugs bereits in der Drehzahl der Räder und dem aktuellen Lenkwinkel enthalten, so dass diese beiden Größen nicht benötigt werden. Weiterhin zeigt sich, dass die auf dem Fahrzeug anliegenden Bremsmomente keine zuverlässige Aussage über die tatsächlich auf das Fahrzeug wirkende Bremsbeschleunigung liefern. Zwar besteht der Vorteil darin, schon vor der tatsächlichen Wirkung einen Bremsvorgang erkennen zu können, jedoch ist dieser stark abhängig von den aktuellen Haftungseigenschaften und dem Zustand der Bremsen. Weiterhin liefern die Drehzahlinformationen und die Beschleunigung des Accelerometers ebenfalls Informationen über die stattfindende Verzögerung, weshalb die Bremsmomente ebenfalls verworfen werden.

Hiermit ergibt sich die folgende Endkonfiguration an Eingangssignalen:

- Drehrate im Fahrzeugkoordinatensystem, jeweils für x-, y- und z-Achse (3)
- Drehratenbeschleunigung im Fahrzeugkoordinatensystem, jeweils für x-, y- und z-Achse (3)
- Beschleunigung im Fahrzeugkoordinatensystem, jeweils für x-, y- und z-Achse (3)
- Drehzahl aller vier Räder (4)
- Lenkwinkel und Lenkgeschwindigkeit (2)

5. Nick- und Wankprädiktion

- Fahrbahnhöhe auf Fahrspurtrajektorie in 5 Metern Entfernung (2)

Somit wurde die Anzahl an Eingangssignalen um 6 auf 17 reduziert, was einer Verringerung der Rechenlast um gut 26 % entspricht.

5.4.3. Vergangene Messpunkte

Für die Auslegung des Systems mit Hinsicht auf die benötigte Rechenleistung stellt die Anzahl der verwendeten vergangenen Datenpunkte für das Modell dar. Aufgrund der verwendeten linearen Modellierung nimmt der Rechenaufwand linear mit der Anzahl an Messpunkten zu. Jedoch bedeuten weniger Messpunkte auch ein geringeres Vorwissen über den Fahrzeugzustand und seinen Verlauf, womit die Prädiktion meist ungenauere Prädiktionsergebnisse liefert. In Grafik 5.8 ist ein Vergleich von zwei Prädiktionen mit nur einem und zwei Messpunkten pro Eingangssignal dargestellt.

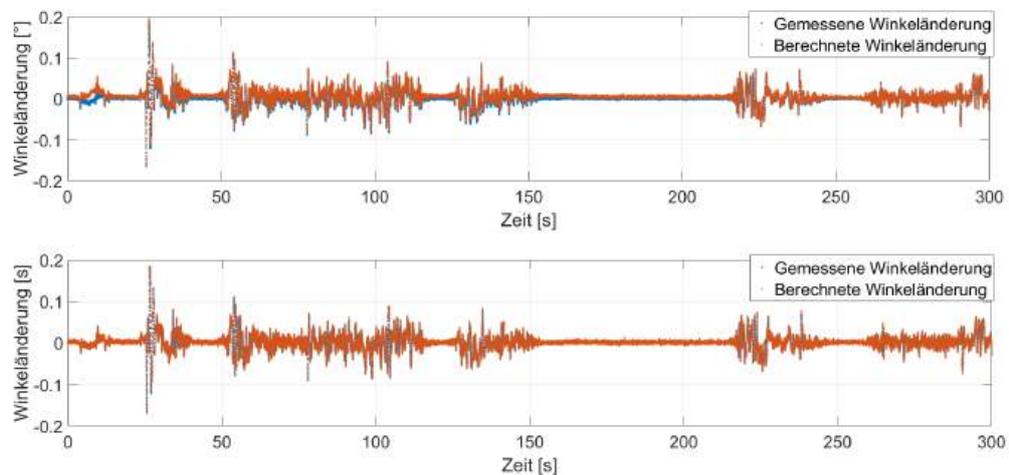


Abbildung 5.8.: Vergleich der Prädiktion und der tatsächlichen Nickwinkel für ein Messpunkt und zwei Messpunkte pro Eingangssignal

Gut zu erkennen ist, dass vor allem in dynamischen Situationen, bei denen der kommende Verlauf abhängig vom bisherigen Verlauf ist, die Prädiktion basierend auf nur einem Messpunkt keine zuverlässigen Werte liefern kann

und die Prädiktionsqualität stark abhängig von der Art der Anregung ist. Bereits ein weiterer Messpunkt ermöglicht es der Prädiktion, zwischen verschiedenen Situationen zu unterscheiden und eine angepasste Prädiktion mit einem konstanteren und niedrigeren Fehler zu liefern. Für die Projektionsstabilisierung ist während des gesamten Verlaufs der Fahrt oder einer dynamischen Aufbaubewegung der maximale Prädiktionsfehler wichtiger als der durchschnittliche Prädiktionsfehler. Dies liegt daran, dass der maximale Fehler später für die größte Abweichung des Symbols vom Sollzustand sorgt. Um die Abhängigkeit dieses Fehlers von der Anzahl an vergangenen Messpunkten zu bestimmen, wurde er für verschiedene Mengen an Messpunkten untersucht. Die Ergebnisse sind in Grafik 5.9 aufgezeigt.

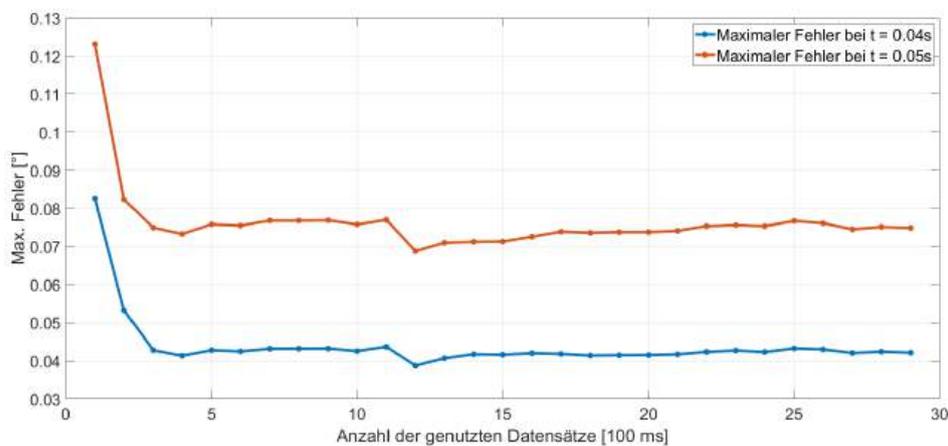


Abbildung 5.9.: Maximaler Prädiktionsfehler für eine unterschiedliche Anzahl an verwendeter Datensätze bei Prädiktionszeiten von 40 und 50 ms

Der maximale Prädiktionsfehler nimmt zu Beginn stark ab, konvergiert aber schnell gegen einen minimalen Wert. Die Fahrzeugbewegungen und -eigenschaften über 300 ms hinaus scheinen keinen Einfluss mehr auf die zukünftige Bewegung zu haben, da hier sowohl für das Nicken als auch das Wanken der Tiefpunkt erreicht wird. Nimmt man noch ältere Bewegungsinformationen als Eingangsgrößen auf, lässt sich keine weitere Verbesserung der Prädiktion mehr erzielen. Vermutlich wird das Modell zu komplex und es kommt zu einem Overfitting des Modells.

Ebenfalls ist die Abnahme des Fehlers ab 4 Messpunkten, also 40 ms, ver-

5. Nick- und Wankprädiktion

nachlässigbar gering und im Bereich von Trainingsungenauigkeiten. Basierend auf diesen Ergebnissen und um ein schlankes System mit möglichst geringer Komplexität zu erhalten, wird für die Prädiktion der Eingang auf 4 vergangene Messpunkte begrenzt.

5.4.4. Prädiktionszeit

Die Prädiktion liefert wie beschrieben die Nick- und Wankwinkeländerungen bis zu einem festen Prädiktionszeitpunkt in der Zukunft. Je weiter dieser Wert in der Zukunft liegt, desto mehr Zeit ist für das Stabilisierungssystem, die Fahrzeugprojektion anzupassen. Jedoch zeigt sich, dass die Genauigkeit der Prädiktion mit zunehmender Prädiktionszeit abnimmt. Aus diesem Grund muss ein Zeitwert festgelegt werden, welcher einen passenden Kompromiss zwischen Größe und Genauigkeit für die Stabilisierung bietet. Basierend auf der bisherigen Konfiguration des Prädiktionssystems wird deshalb der maximale und durchschnittliche Prädiktionsfehler für verschiedene Prädiktionszeiten analysiert. Die erhaltenen Resultate sind in Grafik 5.10 dargestellt.

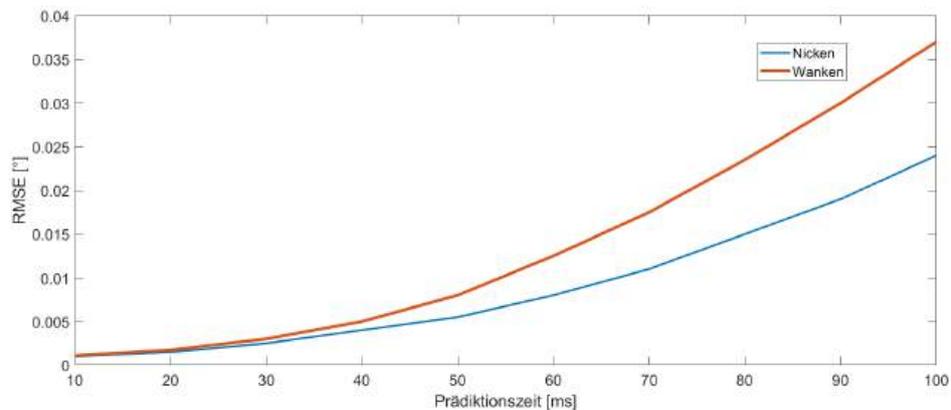


Abbildung 5.10.: Maximaler Prädiktionsfehler für verschiedene Prädiktionszeiten

Betrachtet man die Ergebnisse, so fällt auf, dass das Fehlerverhalten einen exponentiellen Zusammenhang zur Prädiktionszeit aufweist und stetig zunimmt. Vor allem im Zeitbereich bis 50 ms werden gute Ergebnisse geliefert,

die den Betrachtungen aus Kapitel 3 entsprechend für die Projektionsstabilisierung verwertbar sind. Diese 50 ms werden dementsprechend auch als maximale Prädiktionszeit des Systems festgelegt, um die Verzögerung der Projektionsdarstellung in der prototypischen Integration von 30 ms und der Inertialsensorverzögerung von bis zu 10ms auszugleichen und einen Puffer für die Rechenzeit zu erhalten.

5.4.5. Aufbau und Struktur

Mit der bekannten Konfiguration des Prädiktionssystems kann nun der interne Aufbau festgelegt werden, welcher in die drei Bereiche des initialen Trainings, der Prädiktion im Fahrzeug, sowie die stetige Anpassung der Koeffizienten durch das Online-Learning aufgeteilt werden kann.

Das initiale Training erfolgt offline und die Parameter werden als Startwerte eingespeichert. Da die tatsächliche Nickbewegung über den Inertialsensor (wenn auch zeitverzögert) ebenfalls anliegt, ist ein weiteres Online-Training vorhanden, welches die Parameter laufend aktualisiert.

Das Verhalten des Fahrzeugs ist unterschiedlich für verschiedene Fahrbahnuntergründe. Deshalb wird ein Multi-Modell-Ansatz implementiert, bei dem zwischen drei verschiedenen Untergründen unterschieden werden soll. Dies sind gepflasterte Straßen, Asphalt/Beton-Fahrbahnen sowie unbefestigtes Gelände. Für jeden Untergrund wird im Vorfeld ein eigenes Modell antrainiert. Im Betrieb sind stets alle Modelle aktiv, werden für die Prädiktion verwendet und online nachtrainiert. Dabei ist der endgültige Prädiktionswert, der vom System ausgegeben wird, eine Fusion der einzelnen Modellausgänge.

Training

Das Training des Prädiktionssystems erfolgt separat für jedes einzelne Modell. Dazu werden Fahrten auf den jeweiligen Untergründen für verschiedene Fahrsituationen, wie Kurvenfahrten, Brems- und Beschleunigungsmanöver, durchgeführt und die Signalwerte aufgezeichnet. Anschließend

5. Nick- und Wankprädiktion

erfolgt ein Offline-Training für die einzelnen Modelle entsprechend Abschnitt 5.3.1. Dazu werden die einzelnen Eingänge aufgrund der verschiedenen Einheiten und Größen auf einen Wertebereich zwischen -3 und +3 skaliert. Der jeweilige Skalierungsfaktor ist dabei fest und wird im späteren System ebenfalls für die Inferenz und das Online-Learning abgespeichert.

Die Parameter können dann über die Normalengleichung für alle drei Modelle bestimmt und im Fahrzeug abgespeichert werden.

Prädiktion im Fahrzeug

Die drei antrainierten Modelle werden zu jedem Zeitschritt mit den aktuellen sowie drei vergangenen Messwerten der Eingangssignale eingespeist und die entsprechenden Nick- und Wankwinkel inferiert. Der prädizierte Nick- und Wankwinkel des Gesamtsystems stellt sich anschließend aus den gewichteten Ausgängen aller drei Modelle zusammen zu

$$\theta_{pred} = G_{M1} \cdot \theta_{M1} + G_{M2} \cdot \theta_{M2} + G_{M3} \cdot \theta_{M3} \quad (5.6)$$

Das Gewicht G_{Mx} des einzelnen Modells Mx wird über den Fehler der Prädiktion f_{Mx} zu den vergangenen 10 Berechnungsschritten bestimmt zu

$$G_{Mx} = 1 - \frac{f_{Mx}}{S_f} = 1 - \frac{f_{Mx}}{f_{M1} + f_{M2} + f_{M3}} \quad (5.7)$$

Online-Learning

Während der Fahrt wird ein stetiges Online-Learning basierend auf gepufferten Messwerten des Drehratensensors durchgeführt. Dabei wird das Gradient-Descent Verfahren angewendet. So erhält man für jeden Zeitschritt einen Deltawert δ_{coeff} , um welchen die Prädiktionsparameter angepasst werden sollen. Dieser Wert wird davor jedoch noch mit einer Lernrate λ begrenzt.

Die Lernrate ist dabei abhängig von der Gewichtung in der Prädiktionsberechnung und damit dem Prädiktionsfehler im Vergleich zu den beiden

anderen Modellen. Bei einem Gewicht $G_{Mx} < 0,3$ wird dabei gar kein Update der Parameter durchgeführt, um eine Konvergenz der Modelle zu vermeiden. Falls das Gewicht größer ist, wird die neue Lernrate direkt aus der Multiplikation von dem Gewichtsfaktor mit der Basis-Lernrate bestimmt zu $\lambda_{Mx} = \lambda_{Basis} \cdot G_{Mx}$.

Damit ergibt sich folgende Gesamtstruktur aus Eingangsgrößen, der Verarbeitung und Pufferung und der damit prädizierten Endwerte:

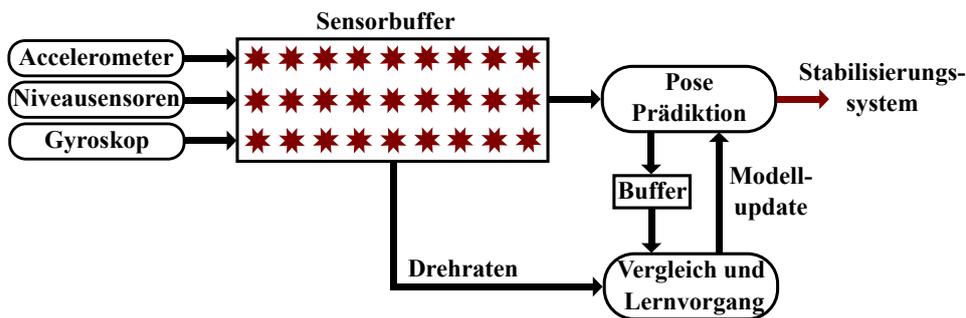


Abbildung 5.11.: Ablauf des Online-Learnings

5.5. Ergebnisse und Komplexität

Die Prädiktionsqualität des aufgebauten Prädiktionssystems wird mit Messungen im realen Fahrzeug validiert. Abschließend folgt eine kurze Betrachtung der Komplexität und Echtzeitfähigkeit.

5.5.1. Messungen

Um die Qualität der Prädiktionsergebnisse zu evaluieren, wurden verschiedenen Messungen im realen Fahrzeug durchgeführt. Das Ausgangsmodell wurde dabei anhand Messdaten einer etwa einstündigen Fahrt antrainiert. Die Qualität der Prädiktion wird anhand von fünf verschiedenen Messfahrten unter unterschiedlichen Fahrbedingungen ausgewertet. Dabei werden Teilfahrten mit verschiedenen Fahrbahnuntergründen und Geschwindigkeiten zusammengestellt, um ein möglichst umfassendes Bild zu erhalten.

5. Nick- und Wankprädiktion

Die Betrachtung erfolgt getrennt für die Nickwinkel- und Wankwinkelprädiktion.

Nickwinkel

In den Abbildungen 5.12 und 5.13 sind die Prädiktionswerte im Vergleich zu den tatsächlichen Sensormesswerten während einem Fahrtabschnitt mit verschiedenen Anregungen dargestellt.

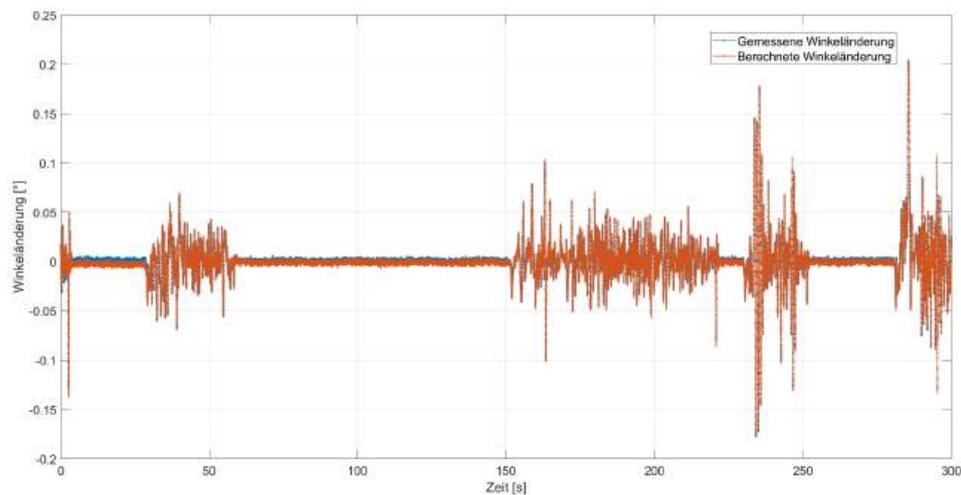


Abbildung 5.12.: Nickwinkelverlaufsausschnitt aus der Beispiel-Messfahrt 1

Wie zu erkennen ist, liegen die Werte nahe beieinander und es kommt zu keinem Zeitpunkt zu unplausiblen Drehwerten durch die Prädiktion. Wertet man die Daten der gesamten, jeweils etwa halbstündigen, Fahrten aus, ergibt sich bei Messfahrt 1 die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers zu $0,0029^\circ$, wohingegen der maximale Fehler, der über den gesamten Messzeitraum auftritt, $0,045^\circ$ beträgt. Über die Messfahrt 2 hinweg liegen diese Werte bei $0,0032^\circ$ für die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers und $0,065^\circ$ für den maximalen Fehler.

In beiden Fahrten ergibt sich somit ein maximaler Fehler, der weit unter der Fehleranforderung von $0,1^\circ$ aus Abschnitt 3.3.4 liegt. Die maximalen Fehler werden dabei vor allem durch eine zu geringe oder zu hohe

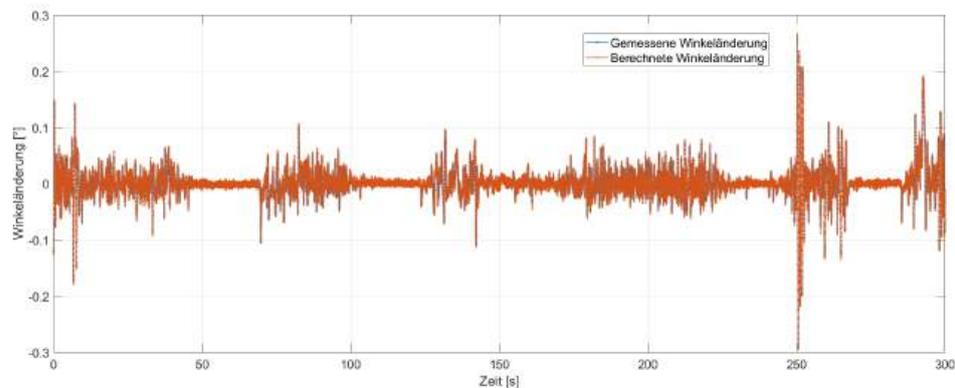


Abbildung 5.13.: Nickwinkelverlauf während der Beispiel-Messfahrt 2

Abschätzung der maximalen Amplitude verursacht und treten damit nicht zu zufälligen Zeitpunkten auf. Dieses Verhalten ist wichtig für die spätere Qualität der Projektionsdarstellung, da ruckartige Bewegungen vermieden werden können.

Wankwinkel

In den Abbildungen 5.14 und 5.15 sind erneut die Prädiktionswerte im Vergleich zu den tatsächlichen Sensormesswerten während derselben Fahrabschnitte dargestellt, dieses Mal jedoch für den Wankwinkel.

Beide Fahrten zeigen ein ähnliches Verhalten der Prädiktion für die Wankwinkel wie für die Nickwinkel. Der maximale Wankwinkelfehler während der Messfahrt 1 beträgt $0,1^\circ$, wobei die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers bei $0,0042^\circ$ liegt. In der Messfahrt 2 liegt der maximale Wankwinkelfehler bei $0,12^\circ$ und die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers bei $0,0057^\circ$. Damit bewegt sich der maximale Fehler leicht über den Anforderungen aus Abschnitt 3.3.4. Auch wenn dies durch die bereits untersuchten geringeren Auswirkungen von Wankbewegungen auf die Projektionsdarstellung akzeptabel ist, wird der Umstand in der Berechnungsauslegung der Projektionsstabilisierung in den Kapiteln 6 und 8 berücksichtigt.

5. Nick- und Wankprädiktion

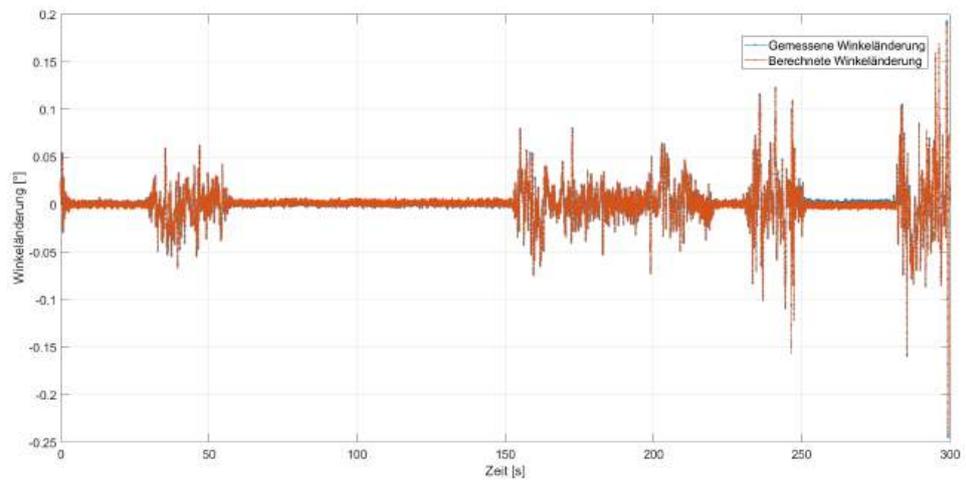


Abbildung 5.14.: Wankwinkelverlauf während der Beispiel-Messfahrt 1

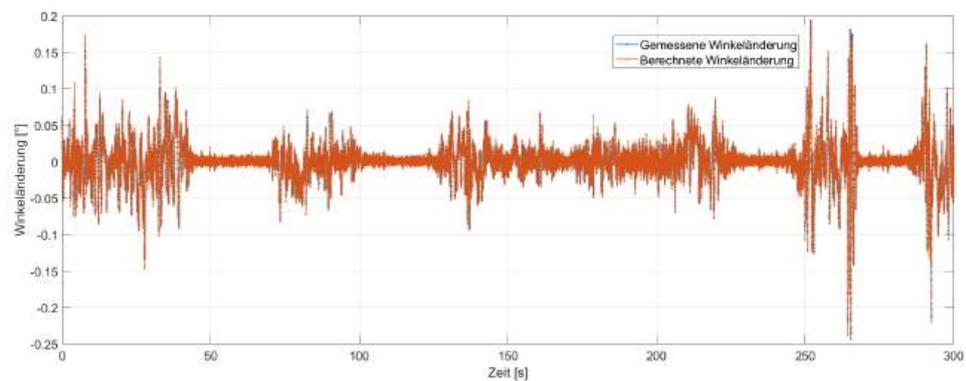


Abbildung 5.15.: Wankwinkelverlauf während der Beispiel-Messfahrt 2

5.5.2. Komplexität

Jeder Berechnungsschritt innerhalb des Systems wird alle 10 ms wiederholt. Jeder Schritt kann dabei in die zwei Teile der Inferenz der Prädiktion, sowie die Aktualisierung der Modellparameter aufgeteilt werden.

Inferenz

Die Inferenz der Prädiktion besteht aus drei Teilinferenzen jeweils für die hinterlegten Modelle. Dabei weist das lineare Modell 17 Eingangssignale mit jeweils vier Messpunkten auf und damit 68 Parameter. Daraus folgen pro Schritt insgesamt 204 Multiplikationen und 201 Additionen. Für die Gewichtung der Einzelwerte sind weitere drei Multiplikationen und zwei Additionen notwendig. Um die Gewichtswerte zu bestimmen, sind weiterhin vier Subtraktionen und eine Addition für die neuen Fehlerwerte und für die Gewichtsbestimmung zwei Additionen, drei Subtraktionen und drei Divisionen nötig. Insgesamt ergibt dies für den Nick- und Wankwinkel 420 Multiplikationen/Divisionen und 416 Additionen/Subtraktionen.

Parameterupdate

Das Online-Learning ist abhängig vom Gewichtungsfaktor und wird abhängig von den Werten für ein Modell bis zu allen drei Modellen angewendet. Dabei werden für das Gradient Descent 69 Subtraktionen/Additionen, 69 Multiplikationen und 68 Divisionen benötigt. Insgesamt ergibt dies maximal 414 Subtraktionen/Additionen und 822 Multiplikationen/Divisionen, falls alle Modelle aktualisiert werden.

Damit benötigen die Inferenz und das Online-Learning relativ viele, aber dabei einfache Grundrechenoperationen, die auf einem fahrzeugüblichen Mikroprozessor in Echtzeit ausgeführt werden können.

Speicherbedarf

Es werden jeweils elf vergangene Fehlerwerte pro Modell und drei vergangene Messwerte pro Eingang gepuffert sowie 204 Modellparameter fest hinterlegt. Damit ergeben sich 419 Werte, die abgespeichert werden müssen.

6. Modellierung der Fahrzeugdynamik

Um die Anpassung der Projektionen an die sich stetig ändernde Fahrzeug- und damit Scheinwerferlage im Vergleich zur Fahrbahn durchführen zu können, ist die Bestimmung eben dieser Lagen unabdingbar. Basierend auf diesen Positionen und Orientierung erfolgt die anschließende Berechnung und Anpassung des neuen Lichtbilds.

Aus diesem Grund werden die Informationen der Drehratenprädiktion verwendet, um ein System zu entwerfen, welches möglichst schnell auf Änderungen der Scheinwerferlage reagiert. Für die Bestimmung der tatsächlichen Scheinwerferpose wird auf dem Fahrzeugdynamikmodell aus der Leuchtweitenregulierung [Yargeldi, 2019] aufbauend eine Beschreibung für die messwertabhängige Scheinwerferdynamik aufgestellt. Abschließend wird aus dieser Abschätzung eine relative Position des Scheinwerfers zu einer als eben angenommenen Fahrbahn hergeleitet, welche als Basis der Projektionsstabilisierung dient.

6.1. Fahrzeugdynamik

Um die für die Projektionswirkung relevanten Größen des Nick- und Wankwinkels, sowie der Hubbewegung des Scheinwerfers zu erhalten, ist eine Beschreibung der Fahrzeugdynamik erforderlich. Die daraus entstehende Modellierung erlaubt es, aus den im Fahrzeug vorhandenen Sensormesswerten die entsprechenden Größen herzuleiten und zu berechnen.

6. Modellierung der Fahrzeugdynamik

6.1.1. Aufbaubewegungen im Fahrzeug

Bevor die Fahrzeugdynamik modelliert wird, ist ein Verständnis über die grundlegenden Aufbaubewegungen der Fahrzeugkarosserie während der Fahrt erforderlich.

In Grafik 6.1 sind die Schwingungsphänomene, die das Fahrzeug während der Fahrt beeinflussen, detailliert aufgeschlüsselt.

		Parameter - Einflüsse											
		Anregung		Karosserie	Innenraum	Vorderachse	Hinterachse	Federung / Dämpfung	Lenkung	Antriebsaggregat	Antriebsstrang	Motorlagerung	Auspuff
		Fahrbahnunebenheiten	Ungleichförmigkeiten (Rad, Bremse etc.) Gas- und Massenkräfte im Motor										
Schwingungs-/Geräuschphänomen	Frequenzbereich [Hz]												
Aufbauschwingungen	1 - 2	●		●		○	○	●		○			
Längsruckeln	4 - 10												
Lastwechselschlag	8 - 20												
Motorstuckern	10 - 13												
Achsschwingungen	10 - 15	●	○										
Lenkungsruhe	10 - 20	●											
Bremsrubbeln	15 - 25												
Leerlaufschütteln/-dröhnen	20 - 30												
Lenkradschütteln	20 - 35												
Karosserieschütteln	20 - 35	○	●	●	●	○	○	○	●	○	○	○	○
Karosseriedröhnen	25 - 75	○	○	●	○	○	○	○		○	○	○	○
Achsrauigkeit	30 - 80	●	○										
Antriebsrauigkeit	50 - 100	○											
Auspuffschwingungen	50 - 200												
Fahrbahngeräusche	50 - 250	●											
Triebwerkresonanzen	100 - 250		●										

Abbildung 6.1.: Schwingungsphänomene im Fahrzeug [Wallentowitz, 2005]

Bedeutend für die Projektionsdarstellungen sind die Einflüsse auf die Karosserie, mit welcher der Scheinwerfer gekoppelt ist. Dies sind vor allem die klassischen Aufbauschwingungen der Karosserie, verursacht durch Fahrbahnunebenheiten, sowie Schüttelphänomene, verursacht durch Ungleichgewichte im Fahrzeug und der Motorlagerung. Dabei sind die Aufbauschwingungen jedoch die amplitudenmäßig weitaus bedeutenderen Bewegungen und für die Projektionsstabilisierung relevant. In Untersuchungen mit einem Versuchsfahrzeug hat sich dieser Umstand bestätigt; Gas-

und Massenkkräfte des Motors, sowie Fahrten auf ebenen Strecken führen zu keiner merklichen Verschiebung der Projektionen.

Durch die stark voneinander abtrennbaren Frequenzbereiche, bei denen Aufbauschwingungen bis 2 Hz und Schüttelphänomene erst ab über 20 Hz auftreten, erlaubt eine entsprechende Bandpassfilterung der Drehratenmesswerte im Fahrzeug.

Fahrzeuge sind aus Komfortgründen darauf ausgelegt, dass Fahrbahnanregungen möglichst wenig zu einem Nicken oder Wanken der Fahrzeugkarosserie führen, sondern in ein vertikales Huben überführt werden. Dabei findet eine frequenzabhängige Umwandlung der relevanten Komponenten statt. Um Phänomene wie Seekrankheit und Übelkeit zu vermeiden, werden Aufbaubeschleunigungen bis etwa 0,5 Hz stark abgedämpft. In Grafik 6.2 ist beispielhaft der Frequenzgang von im Fahrzeug stattfindenden Aufbaubeschleunigungen aufgezeigt. Gut zu erkennen ist, dass der Hauptfrequenzbereich zwischen 0,5 und 2 Hz liegt, um störende nieder- und hochfrequente Schwingungen zu vermeiden.

Neben den Aufbauschwingungen sind die weiteren bedeutenden Einflusskomponente für Aufbaubewegungen der Karosserie durch Momentänderungen bedingte Nick- und Wankbewegungen. Diese entstehen durch die auf das Fahrzeug wirkenden Quer- und Längsbeschleunigungen. Die Bewegungen lassen sich hauptsächlich in die drei Komponenten des Anfahr- und Bremsnickens sowie der Kreis- bzw. Kurvenfahrt einteilen.

Das Fahrwerk ist in Fahrzeugen so ausgelegt, dass Nick- und Wankbewegungen ab über 2 Hz stark abgedämpft werden. Dieser Umstand lässt sich anhand der Messwerte eines Drehratensensors im Fahrzeug bestätigen. So zeigt der Frequenzgang von Nick- und Wankbewegungen während der Fahrt in Abbildung 6.3 einen starken Abfall ab 1,5 Hz im Versuchsfahrzeug. Damit lässt sich die frequenzabhängige Filterung der Aufbauschwingungen auch für diese Bewegungen fortführen.

Dynamikmodelle

Um die Gesamtdynamik des Fahrzeugs zu beschreiben, existieren in der Literatur verschiedene Modelle, die sich durch ihre Komplexität und da-

6. Modellierung der Fahrzeugdynamik

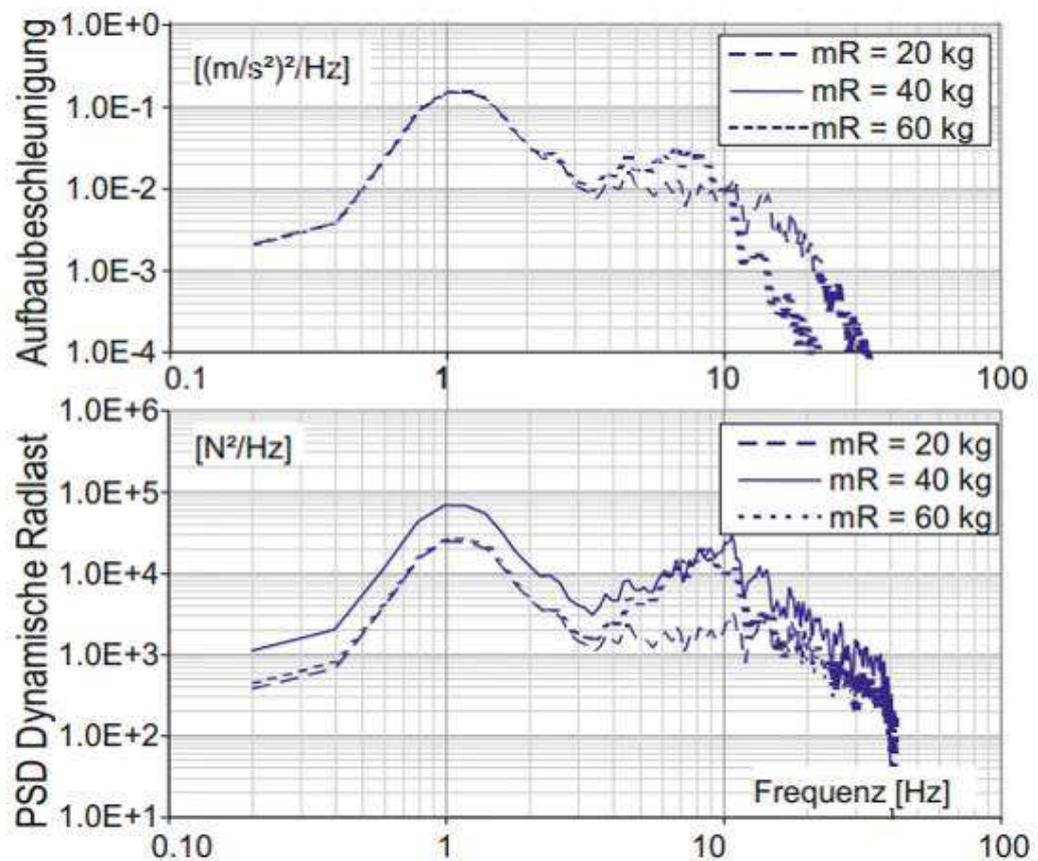


Abbildung 6.2.: Beispielhafter Frequenzgang von in Fahrzeugen auftretenden Aufbaubeschleunigungen in Hubrichtung [Heißing, Ersoy und Gies, 2011]

mit auch den beschreibbaren Freiheitsgraden und Bewegungsarten des Fahrzeugs unterscheiden. Unterreiner [Unterreiner, 2014] liefert hierzu eine kompakte Übersicht der traditionell Verwendung findenden Varianten, wie in Abbildung 6.4 dargestellt.

Um eine Beschreibung der Wank- und Nickbewegungen zu ermöglichen, ist mindestens ein Zweispurmodell oder ein spezielles Einspurmodell, welches um ein Wank- und Nickmodell erweitert wird, vonnöten. Da jedoch auch die Vertikaldynamik mit Ihren Schwingungen eine Rolle für die Lichtprojektion spielt, kann das erweiterte Einspurmodell nicht für die Erfassung der

6.1. Fahrzeugdynamik

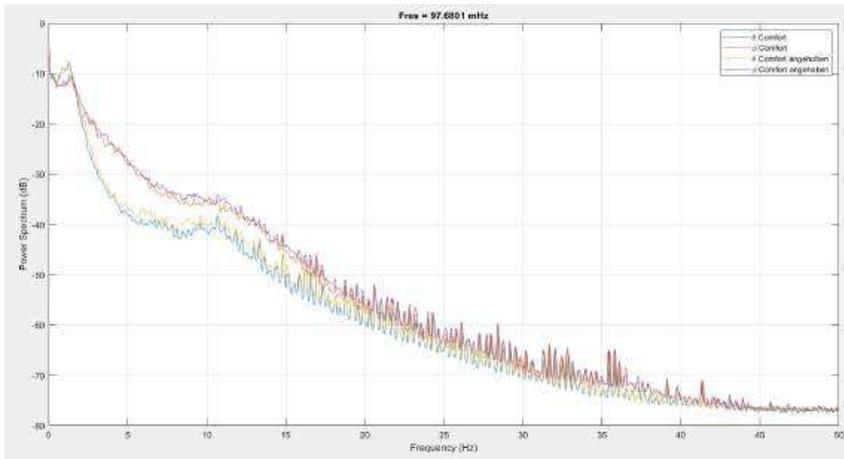


Abbildung 6.3.: Frequenzgang der Nick- und Wankbewegungen in verschiedenen Fahrwerkseinstellungen

Tabelle 1.1: Übersicht der Fahrzeugmodelle

	Modell	Freiheitsgrade	Bewegungsart
Einfachmodelle	Viertelfahrzeug	2	
	lineares ESM	2	
	einfaches Triebstrangmodell	1-2	
Einspurmodelle	nichtlineares ESM	3-6	Ebene Translation (Fahrverhalten), Bahrradius, Gieren
	nl. ESM mit Wankmodell	4-7	
	nl. ESM mit Nickmodell	4-7	
Zweispurmodelle	Fünf-Massen-Modell	14-15	Längsdynamik (Antrieben und Bremsen)
	Schräglenker-Modell	14-20	
MKM	mit räumlicher Radaufhängung	≥ 15	Wank- und Nickbewegungen
FEM		≥ 20	Vertikaldynamik (Schwingungen)
			Komponentenbewegung

Abbildung 6.4.: Übersicht verschiedener Fahrzeugmodelle [Unterreiner, 2014]

6. Modellierung der Fahrzeugdynamik

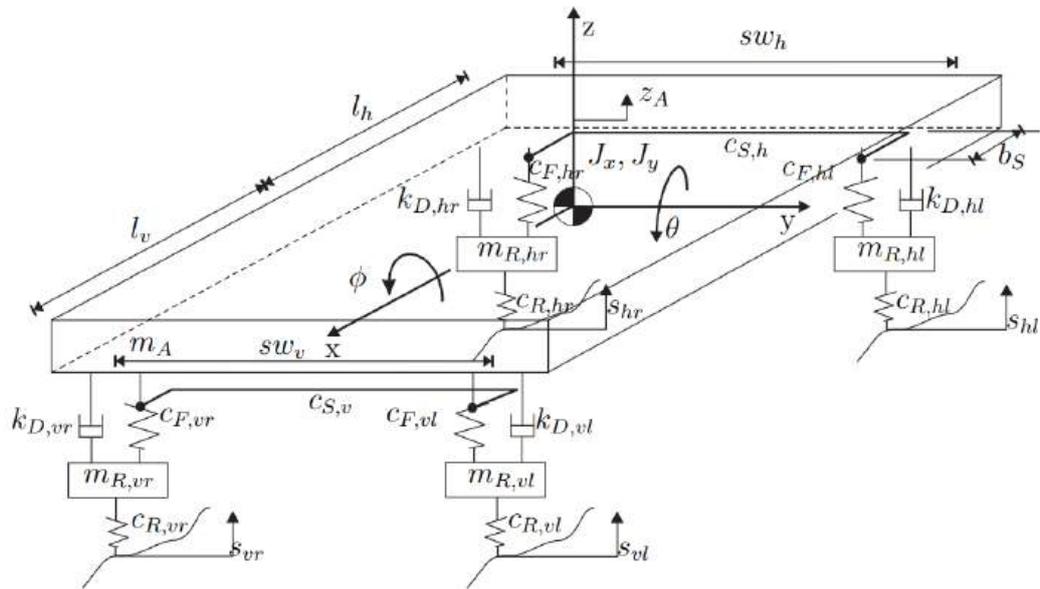


Abbildung 6.5.: Fahrzeugzweispurmodell [Koletzko, 2007]

Hubbewegungen verwendet werden. Somit muss man für eine vollständige Beschreibung auf das deutlich komplexere Zweispurmodell ausweichen. In der Literatur aufgezeigte Zweispurmodelle entsprechend Grafik 6.5 besitzen zusätzliche Komponenten, welche für die Nick- Wank- und Hubbewegung nicht von Relevanz sind. So werden im Fünf-Massen-Modell sowohl die Feder- und Dämpferwerte der einzelnen Radaufhängungen mit nicht-linearen Reifenmodellen als auch fünf Massenmodellierungen jeweils im Schwerpunkt und an den Radaufhängungen.

Die für die vollständige Beschreibung notwendige Parametrisierung führt zu einem stark fahrzeugspezifischen Aufbau und einem hohen Pflegeaufwand. Außerdem bedeutet die große Anzahl an Parametern und die tiefgehende Modellierung einen hohen Rechenaufwand im späteren System, überwiegend für Werte, die für die Stabilisierung nicht benötigt werden. Um diese Komplexität zu umgehen, soll eine vereinfachte Beschreibung der Dynamik aufgebaut werden. Dies ist vor allem von Bedeutung für das Zielmodell, da die Bildstabilisierung auf die gemessenen Bewegungen des Fahrzeugs physikalisch korrekt reagieren und diese kompensieren soll, je-

doch kein tieferes Verständnis über die Ursache des Verhaltens beinhalten muss. Die Messung der Fahrzeugbewegungen (vor allem über das Gyroskop und den Beschleunigungssensor) muss mithilfe des Modells allein in eine entsprechende Hub-, Nick- und Wankbewegung des Fahrzeugs überführt werden können.

Hierzu soll das in [Yargeldi, 2019] bereits etablierte Dynamikmodell für eine LWR um eine vertikale Hubkomponente erweitert werden. Die Nick- und Wankbewegungen der gefederten Fahrzeugmasse werden darin als Drehung des Fahrzeugkörpers, in welchem der Scheinwerfer starr verbaut ist, um sein charakteristisches Rotationszentrum (engl. Center-of-Rotation, CoR) modelliert. Diese Betrachtung wird in Abschnitt 6.3 um einen Freiheitsgrad im Huben erweitert und durch weitere Ergänzungen angepasst.

6.2. Kinematisches Fahrzeugmodell

Das entworfene Fahrzeugmodell stellt eine Erweiterung des in [Yargeldi, 2019] aufgestellten Fahrzeugmodells für eine LWR dar. Dabei werden einige Ungenauigkeiten des dort präsentierten Fahrzeugmodells bereinigt sowie die Berechnungen an die Verwendung des Inertialsensors im zentralen Airbag-Steuergerät angepasst. Die Abschätzung basiert dabei auf einem Sechs-Achs-Inertialsensor mit jeweils drei Sensorachsen für den integrierten Beschleunigungs- und Drehratensensor.

6.2.1. Inertialsensorik

Die bedeutendsten Sensoren für die Bestimmung der Fahrzeugbewegungen in der Projektionsstabilisierung stellt der Inertialsensor dar. Dabei gibt können die Messwerte der Sensorik jedoch nicht direkt verwendet werden und müssen wie im Folgenden aufgezeigt wird bearbeitet werden.

Drehratensensor

Durch die starre Kopplung des Drehratensensors an die Fahrzeugkarosserie werden zu jeder Zeit die tatsächlichen Drehgeschwindigkeiten des Fahrzeugs aufgezeichnet. Über eine Integration dieser Drehraten kann der Drehwinkel des Fahrzeugs berechnet werden. Diese Messungen werden jedoch von zwei Faktoren beeinflusst, welche eine unverarbeitete Verwendung der Signale unmöglich machen.

Der erste Einflussfaktor ist der Bias-Drift von MEMS-Sensoren. Über einen kurzen Zeitraum liefern die Drehratensensoren äußerst genaue Messwerte, welche jedoch mit einem Bias-Offset versehen sind. Dieser Bias wird während der Integration zur Drehwinkelbestimmung aufaddiert und führt damit zu einer konstanten Änderung des berechneten Drehwinkels, selbst bei Stillstand.

Zwar kann durch eine Kompensation der stetige Anteil des Bias herausgefiltert werden, jedoch ist der exakte Biaswert veränderlich. Dieser zeit- und temperaturabhängige Bias-Drift wird damit als eine laufende und sich stetig ändernde Drehbewegung interpretiert. Aus diesem Grund ist eine Hochpassfilterung der Sensorwerte erforderlich, um die Auswirkungen dieser Änderungen abzufangen. Im Langzeitbetrieb ist damit eine Referenzierung zur aktuellen Fahrzeugorientierung durch eine weitere Sensorik erforderlich.

Der zweite Einflussfaktor betrifft die Erfassung von jeglichen Drehbewegungen durch den Drehratensensor. Damit werden auch Fahrten über Fahrbahnneigungsänderungen als entsprechende Drehbewegung registriert, obwohl sich die durchschnittliche Orientierung des Fahrzeugs zur Fahrbahnebene nicht verändert. Die Straßenneigung s während einer Kuppe oder Wanne lässt sich in Abhängigkeit der relativen Position x und des Halbmessers H berechnen nach Gleichung 6.1 [Kuczora, 2015].

$$s(x)[\%] = s_1 + \frac{x}{H} \cdot 100 \quad (6.1)$$

Damit ergibt sich für die Straßenneigungsänderung

$$s(x)' \left[\frac{\%}{m} \right] = \frac{100}{H} \quad (6.2)$$

und umgerechnet in Grad

$$s(x)' \left[\frac{\circ}{m} \right] = \operatorname{atan} \left(\frac{1}{H} \right) \quad (6.3)$$

Nach der Richtlinie für die Anlage von Landstraßen (RAL) [Dipl.-Ing. G. Hartkopf, 2012] ist der empfohlene maximale Halbmesser bei Kuppen aus Gründen der Verkehrssicherheit immer geringer als bei Wannen. Für Außerortsstraßen (EKL4) und Autobahnabschnitte (EKA2) mit den kleinsten erlaubten Halbmessern und Steigungsänderungen gelten die Werte nach Tabelle 6.2.1.

Entwurfsklasse	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Wannenhalbmesser [m]	max. Steigungsänderung $\left[\frac{\%}{m} \right]$
EKL4	100	≥ 2000	0,05
EKA2	-	≥ 4000	0,025

Die maximale Drehrate für Landstraßen ergibt sich damit zu

$$\omega = s'v_{\max} = \operatorname{atan} \left(\frac{1}{H} \right) \cdot \frac{100}{3,6} = 0,7958 \frac{\circ}{s} \quad (6.4)$$

Es gibt keine Vorgaben über die Gestaltung der Krümmungänderung, weshalb keine Frequenzaussage für die Filterung getroffen werden kann. Die maximal auftretende Drehrate ist jedoch gering, womit sie bei entsprechender Hochpassfilterung der Gyrosensorsignale zu keiner signifikanten Fehlsteuerung führen sollte.

Beschleunigungssensor

Wie in Anhang A aufgezeigt, wurde in [Yargeldi, 2019] der Zusammenhang zwischen den Messungen des Beschleunigungssensors und der realen linearen Fahrzeugbeschleunigung aufgezeigt. Durch eine

6. Modellierung der Fahrzeugdynamik

$$\begin{aligned}
 A_{FF} = & R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,HZ} \\ \dot{v}_{y,HZ} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_x r_{y,FF} - \dot{\omega}_y r_{x,FF} \end{bmatrix} + R_{W \rightarrow FF} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \\
 & + \left(\begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_{x,FF \rightarrow HZ} \\ \omega_{y,FF \rightarrow HZ} \\ \omega_{z,FF \rightarrow HZ} \end{bmatrix} \right) \times \left(R_{HZ \rightarrow SF} \begin{bmatrix} v_{x,HZ} \\ v_{y,HZ} \\ v_{z,HZ} \end{bmatrix} \right)
 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Die Winkelgeschwindigkeit zwischen dem Horizontierten und Fahrzeugfesten KS kann über eine Differentiation der Rotationsmatrix berechnet werden. Damit ergibt sich

$$\begin{aligned}
 A_{FF} = & R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,HZ} \\ \dot{v}_{y,HZ} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_x r_{y,FF} - \dot{\omega}_y r_{x,FF} \end{bmatrix} + R_{W \rightarrow FF} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \left(R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} v_{x,HZ} \\ v_{y,HZ} \\ v_{z,HZ} \end{bmatrix} \right)
 \end{aligned} \quad (6.6)$$

Weiterhin wird das Modell um eine Hubkomponente erweitert, um der erweiterten Betrachtung Rechnung zu tragen. Die Hubbewegungen entsprechen einer Verschiebung der Karosserie in z-Richtung im fahrzeugfesten KS. Um die Hubbewegungen des Fahrzeugs zu erhalten, ist deshalb eine Integration der gemessenen Werte des Beschleunigungssensors notwendig.

Schaut man sich Gleichung 6.2.1 genauer an, fällt auf, dass in der bisherigen Betrachtung keine Hubfassung durch den Beschleunigungssensor berücksichtigt wird.

Mit der Hubstrecke s ergibt sich somit

$$\begin{aligned}
 A_{FF} = & R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,HZ} \\ \dot{v}_{y,HZ} \\ 0 \end{bmatrix} + R_{HZ \rightarrow SF} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s'' \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_x r_{y,FF} - \dot{\omega}_y r_{x,FF} \end{bmatrix} + R_{W \rightarrow FF} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \left(R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} v_{x,HZ} \\ v_{y,HZ} \\ v_{z,HZ} \end{bmatrix} \right)
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

Diese Gleichung lässt sich vereinfacht umschreiben zu

$$\begin{aligned}
 A_{FF} = & R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,HZ} \\ \dot{v}_{y,HZ} \\ s'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_x r_{y,FF} - \dot{\omega}_y r_{x,FF} \end{bmatrix} + R_{W \rightarrow FF} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \left(R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} v_{x,HZ} \\ v_{y,HZ} \\ v_{z,HZ} \end{bmatrix} \right)
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

Somit erhält man eine vollständige Beschreibung der Messwerte des Beschleunigungssensors. Es fällt auf, dass die Komponenten der Erdgravitation und der Fahrzeuggeschwindigkeit noch unbestimmt sind. Um diese zu erhalten, müssen diese unter Mithilfe weiterer Sensoren im Fahrzeug und bekannter Fahrzeugparameter bestimmt werden.

6.2.2. Geschwindigkeitsberechnung

Das Fahrzeug besitzt zu jedem Zeitpunkt eine Geschwindigkeit \vec{v}_{HZ} parallel zur x-y-Ebene des horizontalen KS. Diese lässt sich dabei in eine Quer- und Längskomponente aufteilen. Damit ergibt sich je nach Orientierung des Geschwindigkeitsvektors zum Horizontalen KS die Quergeschwindigkeit

6. Modellierung der Fahrzeugdynamik

$v_{x,HZ}$ und Längsgeschwindigkeit $v_{y,HZ}$, abhängig vom Winkel α zur x-Achse:

$$\begin{pmatrix} v_{x,HZ} \\ v_{y,HZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix} \cdot |\vec{v}_{HZ}| \quad (6.9)$$

Der Geschwindigkeitsvektor \vec{v}_{HZ} ist dabei abhängig von der Position am Fahrzeug und unterschiedlich für jeden Punkt. Mithilfe der Raddrehzahl-sensorwerte an den Hinterradpositionen kann die Geschwindigkeit am Rad hinten links v_{HL} und hinten rechts v_{HR} bestimmt werden. Aus diesen lässt sich der Geschwindigkeitsvektor in Sensorposition \vec{v}_{SHZ} bestimmen zu

$$\vec{v}_{SHZ} = v_M \cdot \frac{R_S}{R_M} \quad (6.10)$$

mit v_M als Geschwindigkeit an der Mitte der Hinterachse, R_S als Radius der Kreisfahrt in Sensorposition und R_M als Radius der Kreisfahrt in Position der Hinterachsmitte.

Da aus den beiden Radgeschwindigkeiten sowohl die aktuelle Gierrate des Fahrzeugs ω_z als auch die Geschwindigkeit in der Mitte der Hinterachse v_M ermitteln lässt, kann man hieraus den Radius R_M berechnen:

$$R_M = v_M \cdot \frac{1}{\omega_z} = \frac{v_{HR} + v_{HL}}{2} \cdot \frac{D_{RL}}{v_{HR} - v_{HL}} = \frac{v_{HL} + v_{HR}}{v_{HR} - v_{HL}} \cdot \frac{D_{RL}}{2} \quad (6.11)$$

Ist die x-Komponenten dx und y-Komponente dy der Distanz der Sensorposition zur Mitte der Hinterachse im horizontalen KS bekannt, lässt sich der Radius R_S bestimmen zu

$$R_S = \sqrt{(R_M - dy)^2 + dx^2} \quad (6.12)$$

Über diese Beziehung lässt sich nun auch der Winkel α zum Geschwindigkeitsvektor berechnen zu

$$\sin(\alpha) = \frac{dx}{R_S} \quad (6.13)$$

Setzt man nun 6.11 und 6.12 in Gleichung 6.10 ein, so erhält man

$$\vec{v}_{S_{HZ}} = \frac{D_{RL}}{v_{HR} - v_{HL}} \cdot \sqrt{(R_M - dy)^2 + dx^2} \quad (6.14)$$

Fügt man nun 6.13 und 6.14 in die ursprüngliche Gleichung 6.9 erhält man die endgültige Geschwindigkeit an der Sensorposition im horizontalen KS

$$\begin{pmatrix} v_{x_{S,HZ}} \\ v_{y_{S,HZ}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{1 - \frac{dx^2}{R_S^2}} \\ \frac{dx}{R_S} \end{pmatrix} \cdot \frac{D_{RL}}{v_{HR} - v_{HL}} \cdot \sqrt{(R_M - dy)^2 + dx^2} \quad (6.15)$$

6.2.3. Abschätzung Erdgravitation

Um die aktuell auf den Sensor wirkende Erdgravitation abzuschätzen, wird ein Kalman-Filter verwendet. Im Vergleich zu simpleren Verfahren wie einem Komplementärfilter sind diese in der Lage, das Fehlerverhalten der einzelnen Sensoren zu berücksichtigen und damit genauere Ergebnisse zu liefern. Weiterhin ist das intern genutzte Prädiktions- und Messmodell skalierbar, um eine Anpassung an die Rechenhardware und damit eine Echtzeitfähigkeit zu garantieren.

Der linearisierte Kalman-Filter der in [Yargeldi, 2019] entworfen wurde bildet hierbei einen guten Kompromiss aus geringem Rechenaufwand und guter Fehlerkompensation. Dafür wird das Konzept zur Fremdbeschleunigungskompensation aus [Ahmed und Tahir, 2017] erweitert um ein komplexeres Sensormessmodell. Weiterhin wird, um Modellierungsfehler abzufangen, die Störkompensation aus [J. K. Lee, Park und Robinovitch, 2012] übernommen.

Dabei wird der Ablauf unverändert aus [Yargeldi, 2019] beibehalten und besteht aus folgenden sieben Schritten:

Prädiktion

1. Berechne die a-priori Zustandsabschätzung

$$x_t^- = \Phi_{t-1} x_{t-1}^+ \quad (6.16)$$

2. Berechne die a-priori Fehler-Kovarianzmatrix

$$P_t^- = \Phi_{t-1} P_{t-1}^+ \Phi_{t-1} + Q_{t-1} \quad (6.17)$$

Messupdate/-korrektur

3. Stelle die Messung aus den Teilkomponenten zusammen

$$z = a_t - g x_t^+ - c \alpha_{t-1} - v_t \times G_t - \dot{v}_t \quad (6.18)$$

4. Berechne den Kalman-Gain

$$K = P_t^- H (H P_t^- H + M_{t-1})^{-1} \quad (6.19)$$

5. Führe das Messupdate durch

$$x_t^+ = x_t^- + K(z - H x_t^-) \quad (6.20)$$

6. Update der Fehler-Kovarianzmatrix nach Messupdate

$$P_t^+ = (I - KH) P_t^- \quad (6.21)$$

Beschleunigungsschätzung

7. Schätzung der restlichen externen Beschleunigung als Tiefpassprozess erster Ordnung

$$\alpha_t = a_t - g x_t^+ - v_t \times G_t - \dot{v}_t \quad (6.22)$$

Damit ergibt sich eine Gesamtstruktur nach Diagramm 6.6.

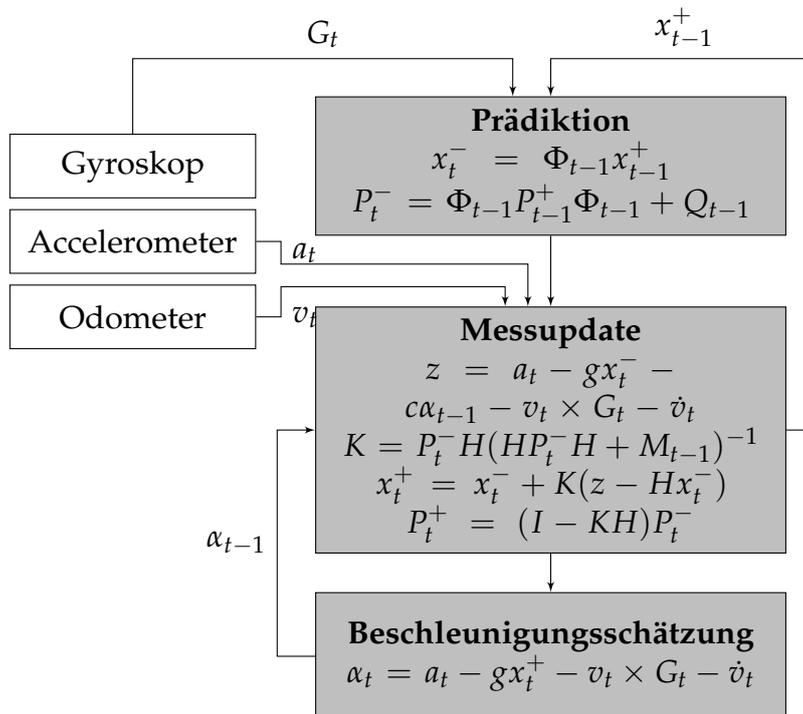


Abbildung 6.6.: Struktur des entworfenen Kalman Filters ([Yargeldi, 2019], editiert)

6.3. Fahrwerksdynamik

Um aus den Werten des Beschleunigungssensors eine Aussage über den aktuellen Zustand des Nick- und Wankwinkels sowie der Hubbewegung zu erhalten, wird ein mathematischer Zusammenhang auf Basis der Fahrwerksdynamik benötigt. Hierbei wird erneut die bereits in [Yargeldi, 2019] eingeführte Modellierung der Fahrwerksdynamik als Grundlage verwendet, dabei erweitert und Modellierungsungenauigkeiten beseitigt.

Die aktuellen Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs werden nach [Matschinsky, 2007] allein durch die auf die Fahrzeugkarosserie wirkenden Beschleunigungen bestimmt. Dabei spielt die Quelle der Beschleunigungen keine Rolle; steht das Fahrzeug beispielsweise am Hang, wirkt die Erdgravitation entlang der Fahrzeuglängsachse und bewirkt eine entsprechende Nickbewegung, auch relativ zur Fahrbahnorientierung. Dabei verursachen

6. Modellierung der Fahrzeugdynamik

wie zu erwarten die Fahrzeugquerbeschleunigungen einen Wank-, und die Fahrzeuglängsbeschleunigungen eine Nickbewegung, womit sich der Nick- und Wankwinkel als Funktion der Längs- bzw. Querbewegung beschreiben lässt.

Betrachtet man nun das in Abschnitt 6.2.1 aufgestellte Sensormessmodell des Beschleunigungssensors, lässt sich die Komponente der linearen Fahrzeugbewegungen umschreiben. Da die maximalen Drehwinkel der Fahrzeugkarosserie gering und auf $\pm 4^\circ$ begrenzt sind, kann eine Kleinwinkelnäherung angewandt werden:

$$R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,HZ} \\ \dot{v}_{y,HZ} \\ s'' \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\theta \\ 0 & 1 & \varphi \\ \theta & -\varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,SF} \\ \dot{v}_{y,FF} \\ s'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,FF} - \theta s'' \\ \dot{v}_{y,FF} + \varphi s'' \\ \theta \cdot \dot{v}_{x,FF} - \varphi \cdot \dot{v}_{y,FF} + s'' \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

Dabei ist die letzte Zeile von besonderer Bedeutung und man erhält für die durch den Sensor gemessene lineare z-Beschleunigung folgenden Zusammenhang:

$$a_{zlinear} = \theta \cdot \dot{v}_{x,FF} - \varphi \cdot \dot{v}_{y,FF} + s'' \quad (6.24)$$

Dabei entspricht die Geschwindigkeitsänderung nach Abschnitt 6.2.2 der linearen Beschleunigung in der jeweiligen Achse. Der Einfluss der Hubbewegung kann aufgrund des geringen Betrags ignoriert werden.

$$a_{zlinear} = \theta \cdot a_{xlinear} - \varphi \cdot a_{ylinear} + s'' \quad (6.25)$$

Damit erhält man einen kompakten Zusammenhang zwischen den linearen Fahrzeugbeschleunigungen und den relevanten Fahrzeugbewegungen. Dies liefert jedoch noch keine Möglichkeit, die Nick- und Wankwinkel aus den Sensormesswerten zu bestimmen. Wie nach [Matschinsky, 2007] aufgezeigt wurde, sind die Nick- und Wankbewegungen abhängig von der gesamten auf das Fahrzeug wirkenden Beschleunigung, was den Rohsensormesswerten entspricht. Damit erhält man für die meisten Fahrzeuge äquivalent zu Anhang A folgende Gleichung:

$$\begin{aligned}\hat{\theta} &= \theta_0 + \theta_1 \cdot a_{xFF} + \theta_2 \cdot a_{xFF}^2 \\ \hat{\varphi} &= \varphi_0 + \varphi_1 \cdot a_{yFF}\end{aligned}\quad (6.26)$$

Setzt man dies in 6.3 ein, so ergibt sich

$$a_{zlinear} = (\theta_0 + \theta_1 \cdot a_{xSF} + \theta_2 \cdot a_{xSF}^2) \cdot a_{xlinear} - (\varphi_0 + \varphi_1 \cdot a_{ySF}) \cdot a_{ylinear} + s'' \quad (6.27)$$

Betrachtet man zusätzlich die Sensorfehler des Accelerometers, so erhält man die vollständige Beschreibung

$$\begin{aligned}a_{zlinear} &= (\theta_0 + \theta_1 \cdot a_{xFF} + \theta_2 \cdot a_{xFF}^2) \cdot a_{xlinear} - (\varphi_0 + \varphi_1 \cdot a_{ySF}) \cdot a_{ylinear} + s'' \\ &\quad + v_{xHZ} \cdot \omega_{y,bias} + v_{yHZ} \cdot \omega_{x,bias}\end{aligned}\quad (6.28)$$

Diese Gleichung ermöglicht es nun, durch eine lineare Regression über die bekannten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, die restlichen Komponenten als Koeffizienten zu bestimmen:

$$\begin{aligned}a_{zlinear} &= (x_0 + x_1 \cdot a_{xFF} + x_2 \cdot a_{xFF}^2) \cdot a_{xlinear} - (x_3 + x_4 \cdot a_{yFF}) \cdot a_{ylinear} + x_5 \\ &\quad + v_{xHZ} \cdot x_6 + v_{yHZ} \cdot x_7\end{aligned}\quad (6.29)$$

Um die Hubbewegungen in höherer Dynamik zu erhalten wird dabei nicht der antrainierte Koeffizient x_5 als Eingangsgröße verwendet, sondern der Wert nach Erhalt neuer Sensordaten über eine Subtraktion der weiteren Komponenten berechnet:

$$\begin{aligned}s'' &= a_{zlinear} - (x_0 + x_1 \cdot a_{xSF} + x_2 \cdot a_{xSF}^2) \cdot a_{xlinear} + (x_3 + x_4 \cdot a_{ySF}) \cdot a_{ylinear} \\ &\quad - v_{xHZ} \cdot x_6 - v_{yHZ} \cdot x_7\end{aligned}\quad (6.30)$$

6.4. Gesamtsystem

Wie aufgezeigt wurde, kann nun mithilfe der gemessenen Beschleunigungen des Sensors der direkte Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs zur Straße als auch die Hubbewegung des Fahrzeugs erfasst werden. Zusätzlich bietet der Drehratensensor die Möglichkeit, die hochfrequenten Bewegungen hochgenau zu erfassen.

Damit wird die Bestimmung des Nick- und Wankwinkels sowie der Hubbewegung in die niederfrequenten Nick- und Wankbewegungen der LWR sowie die hochfrequenten Nick-, Wank- und Hubbewegungen direkt aus den Sensormesswerten aufgeteilt.

Der Frequenzbereich der LWR ist dabei durch die Frequenzantwort des verbauten Schrittmotors begrenzt und künstlich weiter herabgesetzt, um die Haltbarkeit zu erhöhen. Darüber hinaus ist bereits das über die Beschleunigungssensorwerte berechnete Signal auf 1 Hz tiefpassgefiltert.

Entsprechend werden die hochfrequenten Bewegungen über eine Bandpassfilterung der Signale ermittelt. In Tabelle 6.1 sind dabei die Eckfrequenzen aufgezeigt, analog den Betrachtungen in Abschnitt 6.1.1.

Signal	Hochpasseckfrequenz [Hz]	Tiefpasseckfrequenz [Hz]
ω_y	2	20
ω_x	2	20
s''	0,5	10

Tabelle 6.1.: Frequenzübersicht

Damit sind nun die Rahmenbedingungen für die Berechnung des aktuellen Nick- und Wankwinkels des Fahrzeugs, sowie der Hubstrecke gegeben. In Abbildung 6.7 wird ein Überblick zu den Signalflüssen und den jeweiligen Verarbeitungsschritten des Gesamtsystems gegeben.

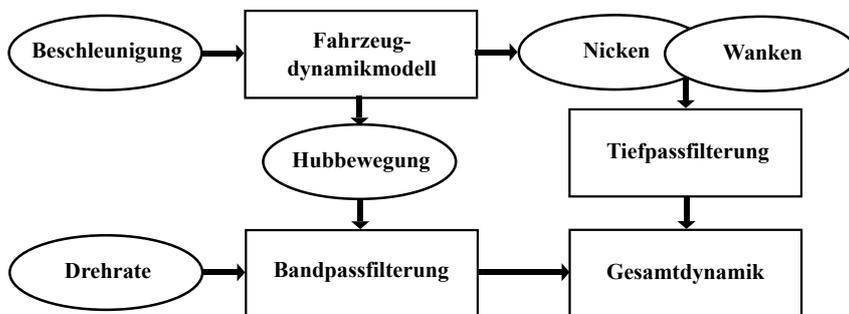


Abbildung 6.7.: Übersicht der Dynamikbestimmung des Fahrzeugs. Zur Vereinfachung sind nur die Hauptsignalkomponenten dargestellt.

7. Bildverarbeitung

Während der Stabilisierung der Fahrzeugprojektionen kommt es zu verschiedenartigen Veränderungen der Lichtbilder, abhängig von den Fahrzeugbewegungen. Die einzelnen im System hinterlegten Symbol- und Lichtverteilungen sind jedoch statische Bilder, die jedem Bildpixel entsprechende Helligkeitswerte zuordnen und auf den Fahrzeuggrundzustand ausgelegt sind. Dabei wird der Projektionsbereich als eben und die Fahrzeugebene als parallel zur Fahrbahn ausgerichtet angenommen.

Bei nun auftretender Fahrzeugdynamik und/oder Änderungen der Projektionsfläche müssen für die einsetzende Anpassung der Projektionen durch die Stabilisierung die vorab hinterlegten Texturen den Fahrzeugbewegungen und der Fahrbahn entsprechend auf der Projektionsmatrix bewegt, verdreht und verzerrt werden.

Die Berechnungen des Stabilisierungsalgorithmus müssen hierfür in mathematische Transformationen und Verschiebungen auf den Texturen übersetzt werden, um eine korrekte Darstellung im Fahrzeugfrontfeld zu ermöglichen. Weiterhin müssen zusätzliche Vorkehrungen getroffen werden, um eine saubere Darstellung ohne Artefakte und fehlerhafte Transformationen zu erhalten, welche den Fahrzeugführer stören und somit die Aufmerksamkeit vom Verkehrsgeschehen ablenken könnten.

Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel Anti-Aliasing Methoden aufgezeigt und auf ihre Wirkung bei statischen und dynamischen Projektionen untersucht, sowie die mathematischen Verfahren erörtert, um eine korrekte Anwendung der Stabilisierung durchzuführen.

7.1. Anti-Aliasing

Bei der Verschiebung und Verdrehung von Symbol- und Lichtverteilungen müssen jedem Pixel des Lichtmoduls neue Helligkeitswerte zugeordnet werden. Die Texturen, die als Grundlage dienen, sind vorberechnet und liegen auf dem Fahrzeugsteuergerät in der Auflösung des Lichtmoduls, also 64×256 , vor. Wird diese Textur nun aufgrund der Stabilisierung auf der Leuchtfläche transformiert und verschoben, so wird die neu berechnete Textur den Positionen der Einzel-LEDs entsprechend abgetastet, um die jeweiligen neuen Wertzuordnungen zu den Pixeln des Scheinwerfersystems zu bestimmen.

Bei Bewegungen unterhalb eines halben Pixels in x- und y-Richtung kommt es dadurch trotz der Verschiebung zu keinen Änderungen der resultierenden Lichtverteilung. Sobald die Pixelgrenze für die Abtastpunkte überschritten wird, kommt es zu einem Umschalten aller Werte einer Pixelzeile und somit zu einer Verschiebung des gesamten Lichtbildes um einen Pixel. Durch die geringe Winkelauflösung des Scheinwerfersystems kommt es bei dynamischen Szenarien zu stark ruckartigen Bewegungen der Projektionen. Dies kann durch Interferenzeffekte mit der Auflösung der hinterlegten Textur noch weiter verstärkt werden, was zu einer treppenartigen Darstellung führt.

Diese Effekte sind also eine Kombination des Alias-Effekts, welcher durch die begrenzte Auflösung der Scheinwerfermatrix entsteht, und des Treppeneffekts, welcher durch die begrenzte Auflösung der vorgeschichteten Texturen entsteht. Durch diese beiden Phänomene entstehen an den Helligkeitsübergängen innerhalb der dargestellten Projektion harte Kanten und verstärkte Treppenbildung. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, wird ein zweistufiges Anti-Aliasing implementiert, bestehend aus einem Supersampling der Bildtextur und einer zugeordneten Interpolation der Helligkeitswerte.

7.1.1. Interpolation

Die Positionen der Abtastpunkte auf der Textur sind durch die Fahrzeugbewegung vollkommen frei, die x - und y -Verschiebung kann infinitesimal klein erfolgen. Dadurch kommt es gekoppelt mit der begrenzten Auflösung der Textur zu Sprüngen der ausgewerteten Helligkeit an Pixelgrenzen.

Durch die Interpolation wird versucht diesem Effekt entgegenzuwirken, indem innerhalb des vorgegebenen Bildes mit beschränkter Auflösung beliebige Zwischenwerte generiert werden. Dazu wird die Helligkeit eines beliebigen Punktes durch Interpolation der Helligkeiten in der Texturmatrix berechnet. Verwendet wird in der vorliegenden Anwendung die Bilineare Filterung, welche eine gute Balance zwischen Qualität und Rechenaufwand bietet.

Im Verarbeitungsablauf wird durch die Interpolation die Textur vorverarbeitet, um die Helligkeiten der durch das Supersampling bestimmten Abtastpunkte zu berechnen. Der endgültige Rechenaufwand des Vorgangs ist dabei abhängig vom angewendeten Supersampling-Verfahren und damit der Anzahl der Abtastpunkte. Der Aufwand ist jedoch konstant für jeden Abtastvorgang und entspricht den klassischen Rechenschritten entsprechend sechs Multiplikationen, sechs Divisionen, drei Additionen und zwölf Subtraktionen.

7.1.2. Supersampling

Das Supersampling ist ein Rekonstruktionsschritt, in welchem versucht wird, Farb- bzw. Helligkeitswerte zwischen den Pixelpositionen der Textur zu rekonstruieren. Um den endgültigen Grauwert des jeweiligen Ausgabepixels zu berechnen, wird das Bild mit einer höheren Auflösung durch mehrere Punkte abgetastet und die verschiedenen Abtastpunkte dann zu einem resultierenden Grauwert für das jeweilige Pixel verrechnet. Dies führt dazu, dass die verwendeten Rekonstruktionsfilter die theoretische Auflösung des Anzeigemediums erhöhen und damit den Einfluss des Treppeneffekts vermindern.

7. Bildverarbeitung

Die Lage der Abtastpunkte und das Verfahren zum Zusammenfassen unterscheiden sich dabei zwischen den verschiedenen vorhandenen Methoden. In Abbildung 7.1 ist der Vorgang am Beispiel von NVIDIAs Quincunx dargestellt.

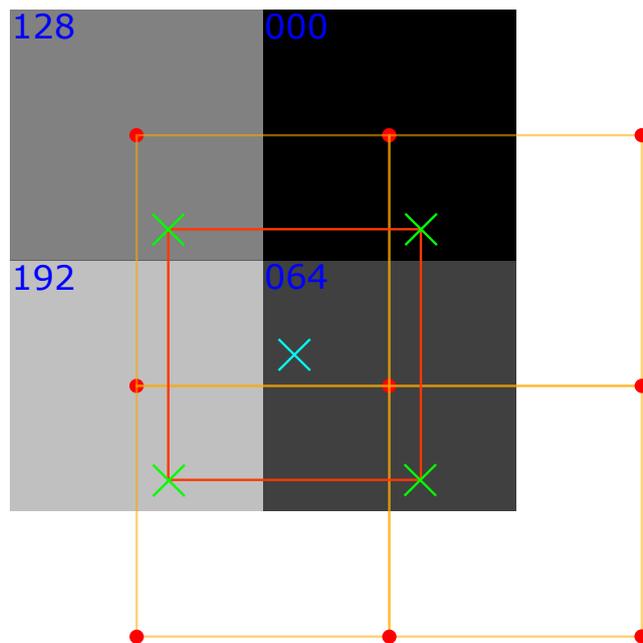


Abbildung 7.1.: Abtastpunkte nach NVIDIAs Quincunx

Diese Abtastungen haben dabei immer eine Tiefpass-filternde Wirkung auf das Bild, da einzelne Pixel über die Auswertung eines größeren Abschnitts im Bildbereich berechnet werden, was eine Dämpfung der hohen Frequenzen im Frequenzbereich zur Folge hat. Anti-Aliasing führt somit zu einem Weichzeichnen des dargestellten Symbols bzw. der Lichtverteilung, bei dem die Kanten breiter sind. Im Folgenden sollen deshalb verschiedene Muster ausgewertet und verglichen werden.

Abtastmuster

Es existieren eine Vielzahl an verschiedenen Abtastmustern, welche in geordnete und ungeordnete Verfahren unterteilt werden können. Die bekanntesten

Vertreter sind in Abbildung 7.2 dargestellt.

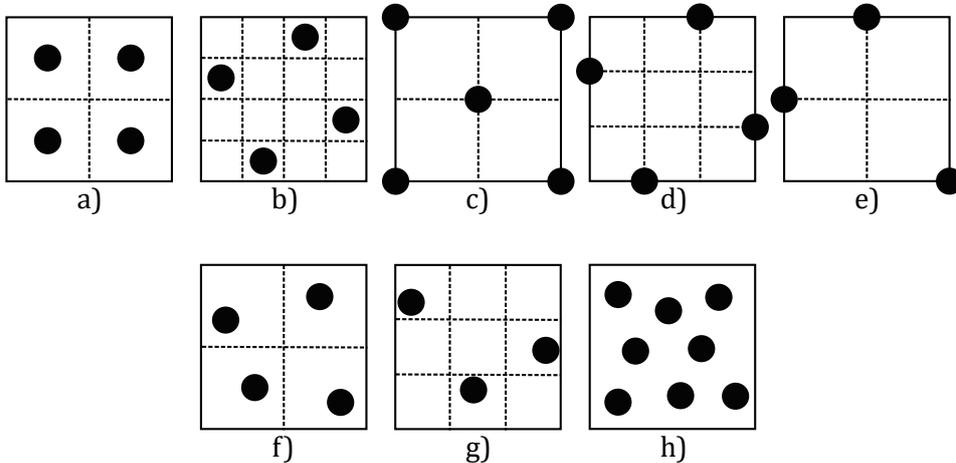


Abbildung 7.2.: Verschiedene Muster für die Abtastung

Das 2x2 Supersampling (a) stellt die Grundvariation aller Supersamplingverfahren dar, bei dem das Einzelpixel für eine vierfache Abtastung symmetrisch gitterförmig unterteilt wird. Der resultierende Farbwert wird durch die Addition der Abtastpunkte gewichtet mit dem Faktor 0,25 berechnet. Dieser Ansatz hat durch seine Symmetrie jedoch Nachteile und enthält eine starke und konstante Frequenzkomponente in der Vertikalen und Horizontalen. Um dieses Problem zu umgehen, wurde das Rotated Grid Supersampling (RGSS, b) eingeführt, welches für jeden Abtastpunkt einmalige x- und y-Koordinaten aufweist. Hierdurch werden mehr Abstufungen an Kanten und damit eine sauberere Darstellung erreicht. Eine weitere Variation des 2x2 Supersampling kann durch Jittering (f) aufgestellt werden, bei dem die Platzierung der Abtastpunkte innerhalb des Subgitters zufällig ausgewählt wird. Durch die Symmetrie des Musters verursachte Alias-Effekte werden dadurch weitgehend beseitigt, jedoch aber durch ein Rauschen im Bild ersetzt, verursacht durch die unterschiedliche Verteilung der Abtastpunkte pro Pixel.

Die ungeordnete und frei skalierbare Variation des RGSS ist das N-Rooks (g). Es sorgt weiterhin dafür, dass in jeder Zeile und Spalte nur ein Abtastpunkt vorliegt, fügt jedoch eine Zufallskomponente ähnlich dem Jittering ein, um die Symmetrie aufzubrechen. Dazu werden die Spalten bzw. Zeilen des

Abtastmusters zufällig vertauscht. Ist keinerlei Symmetrie im Abtastmuster erwünscht, wie es idealerweise der Fall ist, wird auf die sogenannte Poisson Disk Verteilung (h) zurückgegriffen. Diese sorgt dafür, dass Abtastpunkte komplett zufällig über dem Bild verteilt werden, jedoch ein Mindestabstand zwischen den Abtastpunkten immer eingehalten wird, um Klumpenbildung zu vermeiden. Die Poisson Disk Abtastung stellt eine theoretisch nahezu ideale Abtastung dar [Cook, 1986][Yellott, 1983] und entspricht mit ihrer Verteilung blauem Rauschen. Für jeden Abtastpunkt, je nach gewünschter Güte, müssen mehrere Punktkandidaten berechnet und miteinander verglichen werden. Dies wird verursacht durch die Bedingung der Poisson Disk-Verteilung, welche einen minimalen Abstand zwischen zwei Abtastpunkten garantiert.

Alle diese Verfahren sind jedoch rechenintensiv, da für jeden Pixel die entsprechende Anzahl an Abtastpunkten ausgewertet werden muss. Aus diesem Grund wurde in [NVIDIA, 2001] von NVIDIA ein Abtastmuster entworfen, welches sich seine Abtastpunkte mit benachbarten Pixeln teilt und somit die Anzahl an Abtastungen pro Pixel reduziert. Aufgrund der Verteilung entsprechend der Seite 5 eines Würfels wurde das Verfahren als Quincunx (c) bezeichnet und weist eine Gewichtung von 0,5 für den mittleren Pixel und von jeweils 0,125 für die Eckpixel auf.

Als Kombination der Vorteile des RGSS und Quincunx wurde von Akenine-Möller et al. [Akenine-Möller und Ström, 2003] das FLIPQUAD Multi-sampling (d) entworfen. Dazu werden die vier (QUAD) Abtastpunkte des RGSS an die Kanten verschoben, um ein Teilen von Abtastpunkten mit Nachbarpixeln zu ermöglichen, wie durch Quincunx etabliert. Da RGSS sowohl vertikal als auch horizontal nicht spiegelsymmetrisch ist, muss das Muster an sich bei den Nachbarpixeln gespiegelt (FLIP) werden. Aufgrund der Punktsymmetrie des Musters ergeben sich hierdurch jedoch nur zwei verschiedene Abtastmuster für das gesamte Bild, was dafür sorgt, dass keine Vorberechnungen für die Abtastpunkte nötig sind. Somit benötigt FLIPQUAD wie Quincunx nur zwei neue Abtastpunkte pro Pixel, besitzt jedoch wie RGSS einmalige x- und y-Koordinaten der Abtastpunkte und somit eine exaktere Abstufung an Kanten.

Als schnellere Alternative zu FLIPQUAD wurde in [Akenine-Möller, 2003] FLIPTRI (e) präsentiert. Es behält die Eigenschaften des FLIPQUAD bei,

reduziert die Abtastpunkte pro Pixel jedoch auf 3 und die Anzahl der neuen Abtastungen pro Pixel auf 1,25. Da das Muster nicht punktsymmetrisch ist, entstehen bei der Spiegelung auf Nachbarpixel insgesamt vier verschiedene Abtastpunktverteilungen.

Zusätzlich wird nun ein weiteres Abtastverfahren eingeführt. Dieses als Corner SuperSampling, kurz CSS, bezeichnete Verfahren basiert auf Quincunx, verzichtet jedoch auf den mittleren Abtastpunkt. Damit wird nur noch die linke obere Ecke eines Pixels abgetastet und die Anzahl an Abtastungen pro Pixel auf 1 reduziert. Aufgrund der vorgelagerten Interpolation ist auch ohne den zentralen Abtastpunkt eine entsprechende Gewichtung der mittleren Bereiche gegeben.

Eine Gegenüberstellung nach [Hasselgren, Akenine-Möller und Samuli Laine, 2005] der Verfahren ist in folgender Tabelle aufgezeigt:

Verfahren	Abtastungen pro Pixel	Geordnet
2x2 Supersampling	4	+
RGSS	4	+
Quincunx	2	+
Flipquad	2	+
Fliptri	1,25	+
CSS	1	+
Jittered 2x2 Supersampling	4	-
N-Rooks	≥ 2	-
Poisson Disk	beliebig	-

7.1.3. Evaluation

Die aufgezeigten Verfahren im Supersampling unterscheiden sich teilweise deutlich hinsichtlich des Rechenaufwands und der Filtersymmetrie. Um die Eignung der Verfahren für den Einsatz bei der Stabilisierung zu bestimmen, müssen verschiedene Aspekte der Filter hinsichtlich Implementierbarkeit im Fahrzeug, Qualität und Wirkung bei Scheinwerferprojektionen evaluiert werden.

Im ersten Schritt werden deshalb die Verfahren nach ihrer Komplexität beurteilt und Vertreter mit hohen Anforderungen aussortiert. Anschließend wird das Verhalten beim Anti-Aliasing evaluiert und das geeignetste Verfahren auserwählt.

Komplexität

Im Testsystem der μ LED müssen die Berechnungen für jedes der knapp 20.000 Pixel durchgeführt werden. Untersuchungen von Bouville et al. [Bouville, Tellier und Bouatouch, 1991] haben gezeigt, dass mit optimierten Filterverfahren bei bis zu halben Abtastpunkten gleichwertige optische Ergebnisse erhalten werden können. Jedoch ist für eine grundlegende Anti-Aliasing-Wirkung eine Mindestanzahl an Abtastpunkten pro Pixel notwendig. Aus den Erfahrungen der bestehenden Arbeiten auf dem Gebiet wird eine Abtastdichte von 4 Punkten pro Pixel gefordert und die verschiedenen Verfahren auf ihre Komplexität bezogen auf dieser Grundlage bewertet.

Ungeordnete Verfahren Die zufällige Platzierung der Abtastpunkte bei N-Rooks und Poisson Disk verhindert ein Teilen der Abtastpunkte zwischen benachbarten Pixeln. Dies hat zur Folge, dass für vier Abtastpunkte pro Pixel ebenfalls immer vier neue Abtastungen durchgeführt werden müssen.

Geordnete Verfahren Aufgrund der hohen Anzahl an Abtastpunkten pro Pixel werden die geordnete und ungeordnete Variante des 2x2 Supersamplings sowie das RGSS auch nicht näher betrachtet.

Aus diesem Grund kommen nur Quincunx, FLIPQUAD, FLIPTRI und CSS für eine weitere Betrachtung in Frage. In [Hasselgren, Akenine-Möller und Samuli Laine, 2005] wird aufgezeigt, dass zwischen Fliptri und Flipquad beliebig viele verschiedene Muster konstruierbar sind, welche zwischen 1.25 und 2 Abtastungen pro Pixel benötigen und deren Qualität mit steigender Abtastanzahl zunimmt. Zur Evaluation werden jedoch nur Fliptri und Flipquad weiter betrachtet, da diese für die Evaluation ausreichen und ein Tradeoff jederzeit später möglich ist.

Filterverhalten

Um die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Abtastverfahren zu evaluieren, gibt es verschiedene Ansätze, die sich hinsichtlich der Bewertungsparameter unterscheiden. In [S. Laine und Aila, 2006] unterscheiden die Autoren zwischen subjektiven Eigenschaften, repräsentiert durch die psychovisuelle Wirkung auf den Betrachter, und analytischen Parametern wie Diskrepanz- und Spektral-Auswertungen.

Analytische Eigenschaften Analytische Bewertungsverfahren beruhen vor allem auf der Diskrepanzanalyse, da für Verfahren mit wenigen Abtastpunkten pro Pixel die Spektralanalyse oft keine aussagekräftigen Ergebnisse liefert. In [S. Laine und Aila, 2006] wird für die Diskrepanzanalyse ein zweidimensionaler Fehlerfaktor aufgestellt und die Möglichkeit der einzelnen Verfahren auszuwerten, beliebige Subregionen innerhalb eines Pixels auszuwerten. Dabei erzielt Flipquad vor RGSS und Quincunx die besten Ergebnisse, welche gleichzeitig relativ unabhängig vom verwendeten Muster sind.

Psychovisuelle Charakteristik Wichtig für die Stabilisierungsaufgabe sind psychovisuelle Größen wie die Vermeidung von Treppeneffekten an, oder die Verschiebungen von Kanten. Neben der theoretischen Auswertung der Filter-Performance ist vor allem die Auswertung der psychovisuellen Wirkung auf die Insassen und andere Verkehrsteilnehmer der entscheidende Faktor für deren Einsatzfähigkeit im Fahrzeug. Geringe mathematische Fehlerwerte können durch das spezielle Verhalten des Filters zu visuell auffälligeren Artefakten führen. So stellte Naiman [Naiman, 1998] schon 1998 fest, dass vor allem horizontale und vertikale Kanten für die visuelle Wahrnehmung eine entscheidende Rolle spielen. Deshalb müssen Filter insbesondere hier Treppeneffekte und Verschiebungen innerhalb von Kanten verhindern.

Zur Einschätzung der Performance der vier verschiedenen ausgewählten Verfahren wird im Folgenden die Wirkung auf die Projektionsdarstellung untersucht. Dazu werden fünf verschiedene Symbolprojektionen und eine

7. Bildverarbeitung

beispielhafte Abblend-Lichtverteilung in der typischen μ LED-Auflösung von 64×256 Pixeln als Basis verwendet. Zu beachten ist, dass bei den Symbolen ein Großteil des vertikalen Ausleuchtbereichs nicht genutzt werden kann und somit die tatsächliche Symbolauflösung deutlich geringer ist. Die 6 Projektionen sind in Abbildung 7.3 dargestellt.

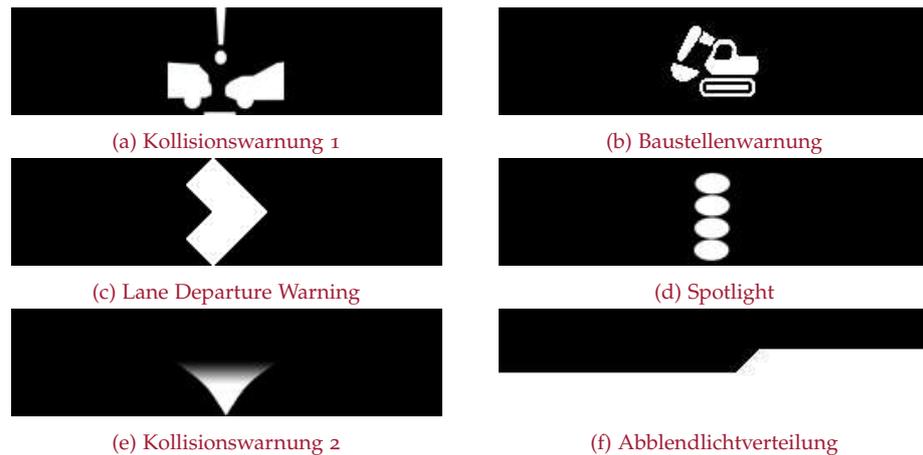


Abbildung 7.3.: Übersicht der 6 untersuchten Projektionen

Gut zu erkennen ist, dass die Kanten eine ausgeprägte Treppenbildung aufweisen, verursacht durch die geringe Auflösung des μ LED-Systems verbunden mit dem eingeschränkten Projektionsbereich für Symbole. Unterschiedlich zu modernen Bildschirmtechnologien kann kein Subpixel-Rendern zur Minimierung der visuellen Wirkung angewendet werden, sondern nur mit weniger hellen Einzelpixeln in Eckbereichen der Kanten entgegengewirkt werden. Die einzelnen Projektionen werden nun durch die 4 ausgewählten Muster abgetastet, jeweils mit und ohne Interpolation. In Figur 7.4 ist das Ergebnis beispielhaft für die Abblendlichtverteilung dargestellt. Die Filterergebnisse bei den weiteren Symbolen sind im Anhang in Abschnitt E.1 zu finden.

Zuerst werden die grundlegenden Verfahren ohne Einfluss der Interpolation betrachtet. Durch die geringe Auflösung des μ LED-Systems ist die kantenhaltende Filterung mit mehr Abstufungen, erreicht durch die rotierten und weniger symmetrischen Abtastpunkte von FlipTri und FlipQuad eher kontraproduktiv. Die Verzeichnung der Kanten ist ein visuell ansprechender

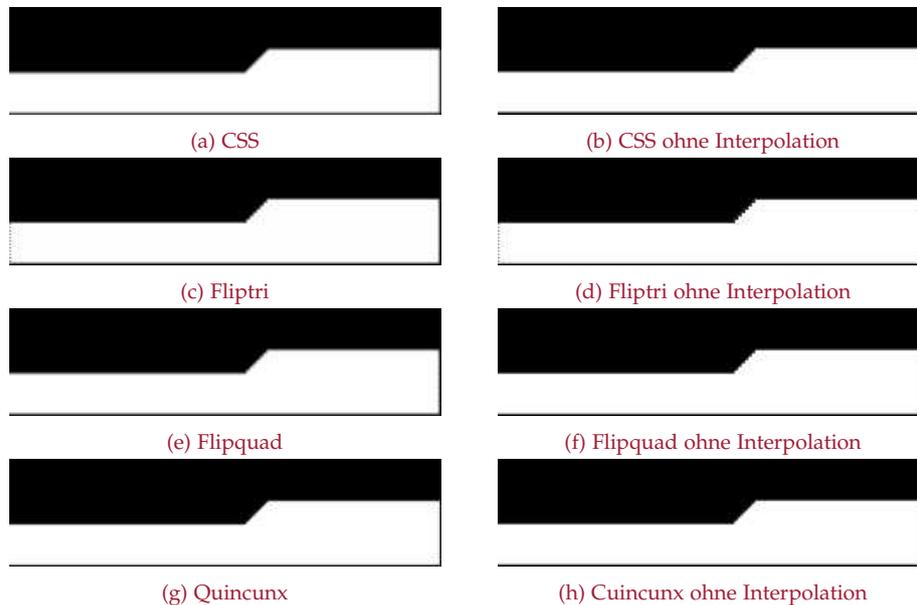


Abbildung 7.4.: Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Abblendlichtverteilung

Effekt, der durch CSS und Quincunx erreicht wird.

Ein weiterer Effekt, der sich aufzeigt, ist die starke Abhängigkeit des Treppeneffektes von der Anzahl an Abtastpunkten pro Pixel. FlipTri fällt mit seinen drei Punkten pro Pixel deutlich hinter die anderen Verfahren zurück, wobei Quincunx mit fünf Abtastpunkten die visuell saubersten Kantendarstellungen erzeugt. Dies bestätigt die im vorherigen Abschnitt als Entscheidungskriterium verwendeten Beobachtungen von Bouville et al. [Bouville, Tellier und Bouatouch, 1991].

Werden nun die einzelnen Ergebnisse mit Interpolation betrachtet, so fällt deutlich die detailgetreuere Rekonstruktion der Symbole auf. Wie zuvor aufgezeigt, kann die geringe Auflösung der Symbole kompensiert und eine Artefaktbildung verhindert werden.

Die bisherigen Betrachtungen haben sich weiterhin nur auf statische Projektionen bezogen und nicht das Verhalten bei einer Animation bzw. dynamischen Verschiebung betrachtet. Aus diesem Grund wurde der Aufbau

7. Bildverarbeitung

mit bewegten Symbolen betrachtet, sowohl rein simulativ als auch in direkter Implementation im Scheinwerferaufbau. Beispielhafte Zeitreihen aus Ausschnitten der Aufnahmen sind im Anhang in Abschnitt E.2 dargestellt.

In der Simulation lassen sich die im statischen Fall aufgestellten Beobachtungen bestätigen. Darüber hinaus zeigt sich jedoch beim CSS ein abgeschwächtes sprunghaftes Verhalten während der Bewegung, wie es eigentlich nur im unbearbeiteten Fall ohne Anti-Aliasing der Fall bei Pixelgrenzen ist.

Übertragen auf tatsächliche Projektionen über den Scheinwerferaufbau wiederholt sich dieses Verhalten des CSS. Weiterhin zeigen FlipTri und FlipQuad ein Schimmerverhalten bei schnellen Bewegungen auf, wodurch sich die Helligkeitswerte der Pixel an sämtlichen Kanten im Bild unterschiedlich schnell verändern. Verursacht wird dies durch die kantenerhaltende Wirkung und die damit verbundene Bewegung der Kantenstufen über die Kantenlänge hinweg. Diese Bewegung sorgt bei dynamischen Verschiebungen des Symbols zu einer äußerst auffälligen Variation der Darstellung, proportional zur Verschiebungsgeschwindigkeit auf der Bildmatrix. Dies widerspricht grundsätzlich dem angedachten Konzept, dynamische Projektionsstabilisierungen für die Insassen möglichst nicht wahrnehmbar zu gestalten.

Fazit

Nach den Auswertungen der vorgehenden Abschnitte hat sich gezeigt, dass ein Anti-Aliasing bestehend aus Interpolation + Quincunx-Supersampling den visuell besten Kompromiss aus statischer und dynamischer Darstellungsqualität sowie Berechnungskomplexität bietet. Obwohl in theoretischen Vorarbeiten (Poisson-Disk) als auch in Anwendungen in der Computergrafik (FlipQuad) andere Verfahren den Vorzug erhalten, sind diese aufgrund der eingeschränkten zur Verfügung stehenden Rechenleistung oder der vergleichsweise niedrigen Auflösung des Scheinwerfersystems nicht vorzuziehen.

In zukünftigen Systemen mit erhöhter Auflösung wird eine geringere Anzahl an Abtastpunkten benötigt werden. Aus diesem Grund kann vermut-

lich auf sparsamere Verfahren wie FlipQuad oder so FlipTri ausgewichen werden. Auch kann die äußerst rechenintensive Interpolation durch eine Speicherung der Symbole in erhöhter Auflösung vermieden werden. Es zeigte sich, dass die visuelle Wirkung aufgrund der Fehler in der Optik, welche eine Tiefpass-ähnliche Wirkung aufweisen, in diesen Fällen auch ohne eine entsprechende Filterung erreicht werden kann.

7.1.4. Berechnung

Im ersten Schritt wird digital die Textur der aktuell dargestellten Symbol- oder Lichtverteilung eingeladen. Als Vorbereitung für die Helligkeitsberechnung wird ein Padding des Bildarrays benötigt. Je nach Umsetzung und Darstellung sind hier verschiedene Vorgehen möglich:

Das dargestellte Symbol kann entsprechend der realen Dynamik verschoben werden, ohne dass das Scheinwerfersystem es noch vollständig darstellen kann. Dadurch kommt es zu einem Abschneiden des Symbols bei der Darstellung. Dies hat den Vorteil einer exakten Bewegungskompensation, jedoch können einzelne Symbole in Extremsituationen keinen sinnvollen Informationskontext mehr bieten. Alternativ kann die Verschiebung künstlich begrenzt werden, wenn die Symboldarstellung erhalten werden soll. Hierfür ist ein Symbolbereich definiert, welcher immer vollständig auf der Scheinwerfer-Bildmatrix dargestellt werden muss, was zur Folge hat, dass darüberhinausgehende Verschiebungen nicht kompensiert werden können. Beide Vorgehensweisen sind in Abbildung 7.5 gegenübergestellt.

Da bei der Begrenzung der Symboldarstellung auf das Bildarray ohnehin die Darstellung dysfunktional aufgrund der verschobenen Projektionsgeometrie ist, wird ein Abschneiden der Symbole präferiert, und im folgenden Beispiel wird mit einer Stabilisierung der Symbolprojektion im vollen Projektionsbereich fortgefahren. Dazu wird die Bildmatrix mit unbeleuchteten Pixeln an allen Kanten ergänzt, entsprechend der Auflösung des Scheinwerfermoduls und damit der maximal möglichen Verschiebung.

In der Realität sind diese Verschieberegionen nur in der Vertikalen erreichbar, wie im Fahrdynamik-Abschnitt aufgezeigt. In der Horizontalen müssen und sollen Gierbewegungen nicht kompensiert werden, weshalb nur kleine



Abbildung 7.5.: Symbolprojektion auf dem Pixelarray für ein Pseudo-Nickaustgleich. (a) Grundzustand, (b) Reale Verschiebung und (c) Begrenzte Verschiebung.

Beiträge der Wankbewegungen einen Einfluss ausüben. Aus diesem Grund erfolgt eine kleine Einschränkung auf dieser Achse auf das gleiche Padding wie in der Vertikalen. Somit ergibt sich für die ursprünglich 64×256 große Bildmatrix eine endgültige Größe von 192×384 . In [Abbildung 7.6](#) ist der Paddingvorgang am Beispiel einer Bildmatrix mit 8×32 Pixeln dargestellt.

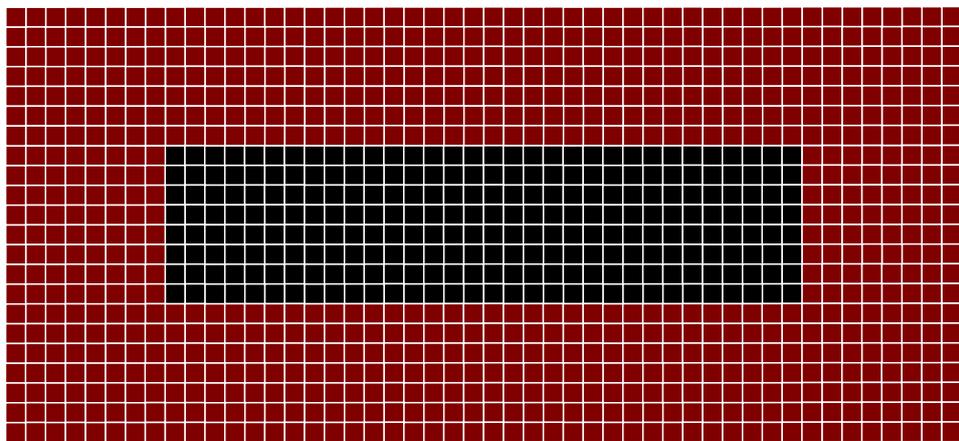


Abbildung 7.6.: Digitale Bildmatrix vor (schwarz) und nach dem Paddingvorgang (rot)

Anschließend wird auf Basis der von der Stabilisierung berechneten neuen Zuordnung von Helligkeitswerten der abgespeicherten Textur auf die Bildmatrix das Anti-Aliasing durchgeführt.

7.2. 2D-Transformation

Wie in Kapitel 3 aufgearbeitet soll durch die Projektionsstabilisierung dynamisch eine angepasste Projektion berechnet werden, durch welche die Darstellung möglichst konstant bleibt.

Projektionen sind definiert als Abbildungen aus einem Raum der Dimension n in einen Raum der Dimension m mit $m < n$. Auch die Abbildung des Bildes auf der Projektionsfläche in das menschliche Auge stellt dabei eine solche Projektion dar, bei der eine Transformation von drei in zwei Dimensionen erfolgt.

Im Kontext der Projektionsstabilisierung muss die zweidimensionale Bild-darstellung auf der Scheinwerfermatrix durch entsprechende Transformationen an die neue Projektionsgeometrie angepasst werden.

7.2.1. Systemauslegung

Als Basis der Bodenprojektion dient eine feste perspektivische Transformation der hinterlegten Symbole. Um diese initial aufzustellen, muss sie den Projektionseigenschaften des jeweiligen Systems entsprechend ausgelegt und berechnet werden. Dieser Vorgang soll für das Beispiel des verwendeten Versuchsträgers präsentiert, und die Transformationsmatrix hergeleitet werden. Betrachtet wird eine geplante Symbolprojektion aus dem rechten Fahrzeugscheinwerfer. Alle Überlegungen können äquivalent auf den linken Scheinwerfer übertragen werden und sind weiterhin abhängig davon, aus welchem Scheinwerfer die Projektionen angedacht sind.

Im ersten Schritt wird der Projektionsbereich festgelegt. Als Beispiel sei hier ein Lichtteppich zu projizieren, welches die Fahrspur des Fahrzeugs ausleuchten und somit den Fahrzeugführer unterstützen soll. Um die Transformation zu berechnen, muss bekannt sein, auf welche Punkte im Raum die Eckpunkte des Symbols projiziert werden sollen. Dabei werden diese im Weltkoordinatensystem mit Ursprung im Scheinwerfer angegeben. Im Grundzustand hat der Scheinwerfer eine Höhe von 0,67 m über der Fahrbahn und befindet sich 0,2 m hinter der Fahrzeugfront. Die Eckpunkte

7. Bildverarbeitung

der Lichtteppichprojektion sind in Abbildung 7.7 aus der Vogelperspektive dargestellt.

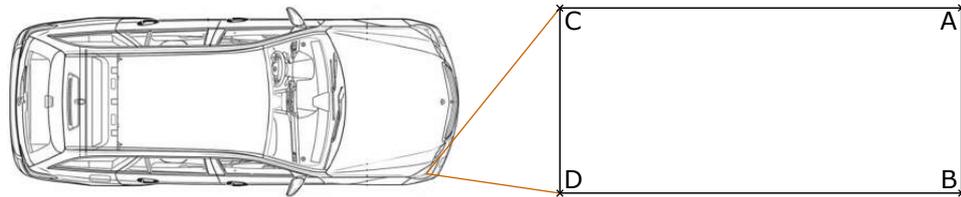


Abbildung 7.7.: Projektion eines Lichtteppichs aus der Vogelperspektive. Zusätzlich eingezeichnet sind die Eckpunkte des Projektionsbereichs.

Die Spur hat eine Breite von 2 m und ist zur Fahrzeugmitte zentriert. Sie beginnt ab 10 m Entfernung und ist 5 m lang. Damit ergeben sich folgende Koordinaten:

Koordinate	x	y	z
Punkt A	-1,7	0,67	15,2
Punkt B	0,3	0,67	15,2
Punkt C	-1,7	0,67	10,2
Punkt D	0,3	0,67	10,2

Tabelle 7.1.: Punktkoordinaten

Da der Scheinwerfer um 4° nach unten verdreht ist, müssen diese Punkte in das Scheinwerferkoordinatensystem verdreht werden. Dabei gilt:

$$X' = RX = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(4^\circ) & -s(4^\circ) \\ 0 & s(4^\circ) & c(4^\circ) \end{bmatrix} X \quad (7.1)$$

Wendet man dies auf die Punkte von Tabelle 7.1 an, so erhält man die aktualisierten Punkte:

Koordinate	x	y	z
Punkt A	-1,7	-0,13	15,2
Punkt B	0,3	-0,13	15,2
Punkt C	-1,7	0,14	10,2
Punkt D	0,3	0,14	10,2

Tabelle 7.2.: Punktkoordinaten

Wird der Scheinwerfer als inverse Kamera modelliert, kann äquivalent zu den Betrachtungen in Abschnitt 2.4.4 eine Abbildungsmatrix aufgestellt werden mit

$$K_s = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Damit ergibt sich für die Pixel:

$$u = K_s \cdot L = \begin{bmatrix} \frac{x \cdot f_x}{z} & \frac{y \cdot f_y}{z} & 1 \end{bmatrix}^T \quad \text{mit } L = \begin{bmatrix} \frac{x}{z} & \frac{y}{z} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (7.3)$$

Die Optik des Scheinwerfers ist ausgelegt, um einen möglichst gleichbleibenden Winkelbereich pro Pixel abzudecken. Dabei wird über 256 Pixel ein Bereich von 20° in der Horizontalen bzw. über 64 Pixel ein Bereich von 5° in der Vertikalen abgedeckt. Über diese Werte kann für beliebige Pixelpunkte der Auftreffpunkt auf einer Wand in 10 m Entfernung berechnet werden. Nummeriert man nun die Pixel ausgehend vom Projektionszentrum von -1 bis -128 nach links und 1 bis 128 nach rechts, so ergibt sich für Pixel 128 am rechten Rand eine Horizontalverschiebung von

$$10 \text{ m} \cdot \tan(10^\circ) \approx 1,76 \text{ m} \quad (7.4)$$

Daraus lässt sich die Brennweite bestimmen zu

$$128 = \frac{y \cdot f_y}{z} = \frac{1,76}{10} f_y \Leftrightarrow f_y = \frac{10 \cdot 128}{1,76} \approx 730 \quad (7.5)$$

7. Bildverarbeitung

Die Brennweite f_x ist dabei aufgrund des symmetrischen Aufbaus identisch. Dadurch lässt sich die Abbildungsmatrix berechnen zu:

$$K_s = \begin{bmatrix} 730 & 0 & 0 \\ 0 & 730 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

Fügt man die nun bekannten Brennweiten in Gleichung 7.2.1 ein und verwendet die Projektionspunkte aus Tabelle 7.2, so erhält man die Punkte auf der Bildmatrix des Scheinwerfers wie in Tabelle 7.3 dargestellt.

Bildkoordinate	x	y
Punkt A	-82	-6
Punkt B	14	-6
Punkt C	-122	10
Punkt D	21	10

Tabelle 7.3.: Punktkoordinaten

Über die Zuordnungen der Werte aus Tabelle 7.3 zu den entsprechenden Eckpunkten auf der Symboltextur, kann die perspektivische Transformationsmatrix M bestimmt werden. Dies erfolgt beispielsweise über die OpenCV Funktion `getPerspectiveTransform`.

$$\begin{bmatrix} tx' \\ ty' \\ t \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

Anschließend kann das transformierte Bild erzeugt werden, indem über die Transformationsmatrix die Helligkeitswerte der einzelnen Pixel an die neue Position abgebildet werden:

$$H_{neu}(x, y) = H_{alt}\left(\frac{M_{11}x + M_{12}y + M_{13}}{M_{31}x + M_{32}y + M_{33}}, \frac{M_{21}x + M_{22}y + M_{23}}{M_{31}x + M_{32}y + M_{33}}\right) \quad (7.8)$$

Wie auffällt, können je nach Projektionsmatrix ungerade Pixelkoordinaten berechnet werden. In diesem Fall kann wahlweise das nächste Pixelzentrum ausgewählt oder die Helligkeit interpoliert werden.

7.2.2. Kompensation Scheinwerferbewegungen

Im Vergleich zur Auslegung des Systems ändert sich die Position der Fahrzeugfront in Relation zur Fahrbahn vor allem in drei Eigenschaften, wie in 3.2.1 aufgezeigt wurde. Diese betreffen die Höhe des Projektionsmoduls von der Fahrbahn sowie den relativen Nick- und Wankwinkel. Alle haben dabei einen Einfluss auf die Projektion, welcher ausgeglichen werden muss. Die Positionierung in der Gesamtsystemgrafik aus dem Einleitungskapitel ist in Abbildung 7.8 dargestellt. Aus diesem Grund wird nun die Kompensation dieser einzelnen Komponenten durch die entsprechende perspektivische Transformation diskutiert.



Abbildung 7.8.: Position der Kompensation der Scheinwerferbewegungen (rot) im Gesamtsystem

Dabei gibt es immer zwei Möglichkeiten, diesen Ausgleich auszuführen, abhängig von dem Vorwissen über die geplante Projektion. Ist nämlich der geplante Projektionsort bekannt, kann entsprechend Abschnitt 7.2.1 eine direkte Neuberechnung der perspektivischen Transformation mit aktualisierten Randbedingungen durchgeführt werden. Alternativ wird eine entsprechende vereinfachte Manipulation durchgeführt, wie in den jeweiligen Abschnitten ausgeführt.

Nick- und Wankausgleich

Das Nicken und Wanken verursacht eine Verdrehung der Scheinwerferorientierung in Bezug zur Projektionsfläche. Durch diese neue Projektionsgeometrie werden die Projektionen verschoben und verzerrt.

7. Bildverarbeitung

Betrachtet man die Berechnungen in 7.2.1, so ist ersichtlich, dass eine Verdrehung des Scheinwerfers für neue Punkte im Scheinwerferkoordinaten sorgt, auf welche das Symbol abgebildet werden muss. Deshalb kann der Ausgleich durchgeführt werden, indem auf das Symbol im Grundzustand eine perspektivische Transformation mit den neuen Randbedingungen angewendet wird. Führt man das Beispiel weiter, muss die Rotationsmatrix aus 7.2.1 entsprechend aktualisiert und die Berechnungsschritte erneut ausgeführt werden. Geht man von einem Nickwinkel des Scheinwerfers von 1° zusätzlich zur initialen Verdrehung um 4° und einem Wankwinkel von 2° aus, so ergibt sich die aktualisierte Rotationsmatrix zu

$$R = \begin{bmatrix} c(2^\circ) & 0 & s(2^\circ) \\ 0 & 1 & 0 \\ -s(2^\circ) & 0 & c(2^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(5^\circ) & -s(5^\circ) \\ 0 & s(5^\circ) & c(5^\circ) \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

und die Punkte A bis D, auf welche abgebildet werden muss, entsprechend zu

Koordinate	x	y	z
Punkt A	-1,17	-0,66	15,25
Punkt B	0,83	-0,66	15,18
Punkt C	-1,34	-0,22	10,2
Punkt D	0,66	-0,22	10,2

Tabelle 7.4.: Punktkoordinaten

Damit kann das neue Bild über eine analoge perspektivische Transformation berechnet werden.

Alternativ kann ein vereinfachtes Vorgehen durchgeführt werden, bei dem das Symbol auf dem Bildarray dem Verdrehwinkel entsprechend verschwenkt und verschoben wird. Die Berechnung wird dabei in zwei Schritten durchgeführt, da sich das Nicken und Wanken in der notwendigen Verarbeitungsweise unterscheiden. Die Reihenfolge der Abarbeitung spielt dabei keine Rolle. Für den Nickausgleich wird das Symbol auf dem Bildarray dem Winkel entsprechend nach unten oder oben verschoben. Beim μ LED-Versuchsträger liegt ein Abdeckbereich von 4,6875 Winkelminuten pro Pixel vor. Damit kann je Richtung eine Anpassung von bis zu $32 \cdot 4,6875 = 150'' = 2,5^\circ$

durchgeführt werden. In Abbildung 7.9 ist eine beispielhafte Verschiebung bei einem Nickwinkel von 2° dargestellt.

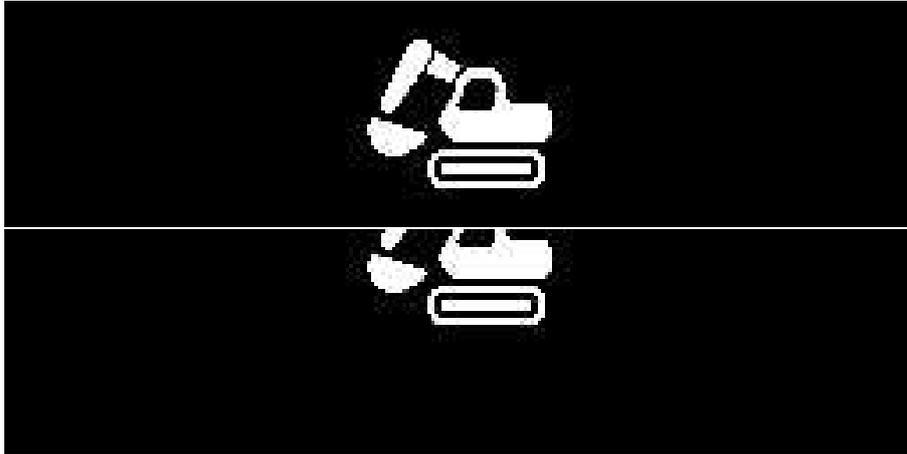


Abbildung 7.9.: Verschiebung der Symbolposition im Abnickfall des Fahrzeugs

Im Wankfall wird das Bild entsprechend verdreht. Hier ist keine einfache Verschiebung möglich und es muss eine 2D-Transformation des Symbols durchgeführt werden. Beispielsweise kann die Rotationsmatrix über die OpenCV Funktion `getRotationMatrix2D` unter der Angabe des Wankwinkels berechnet und das Bild über `warpAffine` transformiert werden. In Abbildung 7.10 ist die resultierende Rotation bei einem Wankwinkel von 5° dargestellt.



Abbildung 7.10.: Verdrehung des Symbols im Wankfall des Fahrzeugs

In diesem Fall ist die Kompensationsberechnung mit beliebigen Lichtbildern ohne weitere Informationen durchführbar. Beide Vorgehensweisen

7. Bildverarbeitung

liefern dasselbe Ergebnis, solange die Abbildung des Scheinwerfers winkelhomen ist. Ist dies nicht der Fall, kann durch eine Neuberechnung der Transformation, bei Vorliegen einer Gesamtkalibration des Scheinwerfers, ein genaueres Ergebnis erzielt werden.

Zu beachten ist weiterhin, dass durch diese Transformation nicht eine gesamte isolierte Nick- oder Wankbewegung im klassischen Sinne kompensiert wird, sondern lediglich die entsprechende Drehbewegung ausgeglichen wird. Die durch das Nicken und Wanken verursachte Hubbewegung wird zusammengefasst mit anderen Hubbewegungen und separat behandelt, wie im Folgenden aufgezeigt.

Hubausgleich

Durch das Nicken- und Wanken, sowie durch allgemeine Aufbaubewegungen variiert die Höhe des Scheinwerfers über der Fahrbahn. Das verursacht eine Veränderung der in 7.1 aufgezeigten Werte für die perspektivische Transformation, indem die z-Distanz zur Fahrbahn angepasst wird. Hubt der Scheinwerfer um 10 cm, so ergibt sich für die Eckpunkte A bis D:

Koordinate	x	y	z
Punkt A	-1,7	0,77	15,2
Punkt B	0,3	0,77	15,2
Punkt C	-1,7	0,77	10,2
Punkt D	0,3	0,77	10,2

Dadurch, dass durch das Huben sich der Abstand des Scheinwerfers zum Projektionsort ändert, muss der Hubausgleich vor dem Nick- und Wankausgleich durchgeführt werden.

Ist die beabsichtigte Projektionsweite bekannt, kann eine Annäherung für die Projektion bestimmt werden, welche einfacher zu berechnen ist und keine Transformation auf Basis des Ausgangsbildes benötigt. Dies wird erneut am Beispiel der Werte aus 7.2.1 verdeutlicht. Zuerst werden für die Ausgangslage die Ausstrahlwinkel gebildet, welche die vier Projektionsgrenzen des Symbols treffen.

Für die Ober- und Unterkanten ergibt sich somit

$$\alpha = \operatorname{atan}\left(\frac{-0,67}{15,2}\right) \approx -2,52^\circ \text{ bzw. } = \operatorname{atan}\left(\frac{-0,67}{10,2}\right) \approx -3,76^\circ \quad (7.10)$$

Hierzu wird die aktuelle Orientierung des Scheinwerfers addiert, wodurch sich beim Beispielnickwinkel von 4° ein Wert von $1,48^\circ$ bzw. $0,24^\circ$ ergibt. Wiederholt man das Ganze unter Berücksichtigung des zusätzlichen Hubs, kann man die neuen Abstrahlwinkel berechnen. Bei 10 cm positivem Hub ergeben sich $1,1^\circ$ bzw. $-0,32^\circ$.

Da die Abstrahlbereiche des Scheinwerfers bekannt sind, kann mithilfe dieser Winkelangaben eine Verschiebung und Dehnung bzw. Stauchung des ausgestrahlten Symbols in der Hochachse berechnet werden, welche für die Anpassung notwendig ist. So fällt beispielsweise der Winkel von $1,48^\circ$ auf

$$\frac{1,48^\circ}{2,5^\circ} \cdot 264\text{px} \approx 38\text{px} \quad (7.11)$$

mit den bekannten Scheinwerferparametern von jeweils $2,5^\circ$ vertikalem Winkelbereich in beide Richtungen sowie einer Auflösung von jeweils 64 Pixeln. Damit ergibt sich eine Verschiebung von Pixel 38 bis 6 auf Pixel 28 bis -8, also eine kombinierte Verschiebung und Dehnung des Projektionsbildes.

Äquivalent kann man das Vorgehen auch auf die Horizontale übertragen, um die vollständige Beschreibung des neuen Lichtbildes zu erhalten. Dabei ist zu beachten, dass der Hubausgleich nach einem bereits erfolgten Nick- und Wankausgleich vorgenommen werden muss, um diesen Einfluss mit zu berücksichtigen. Um die Komplexität der Anpassung gering zu halten, wird auf eine Berücksichtigung des Wankwinkleinflusses verzichtet. Die Einflüsse des Hubens auf die Kompensation des Wankwinkels sind schwach und eine vollständige Betrachtung würde den Rechenaufwand aufgrund der dann notwendigen Transformationen in den Bereich der exakteren perspektivischen Transformation der Ausgangstextur mit kombinierter Nick-, Wank- und Hubbetrachtung rücken.

7.3. Projection-Mapping

Anschließend an die erfolgte Symbolanpassung zur aktuellen Scheinwerferpose wird optional im zweiten Schritt eine exakte Anpassung an die Fahrbahnoberfläche durchgeführt, um textur- und formunabhängig eine gleichbleibende Projektionsanzeige für den Fahrzeugführer zu ermöglichen. Der Zusammenhang dieser Fahrbahnanpassung mit der Gesamtaufbaugrafik aus dem Einleitungskapitel ist in Grafik 7.11 dargestellt.

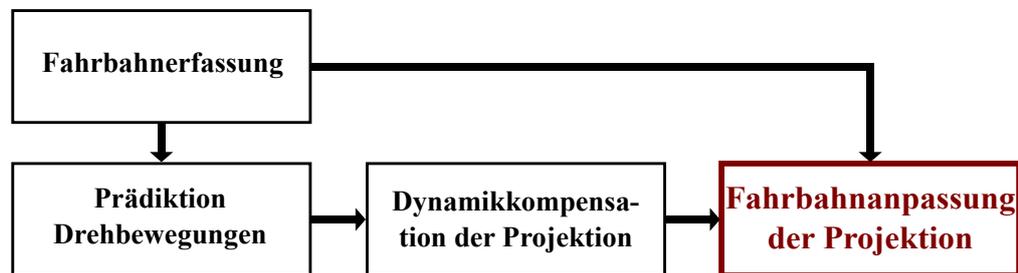


Abbildung 7.11.: Position der Fahrbahnanpassung (rot) im Gesamtsystem

Aus den im vorherigen Abschnitt vorgenommenen Untersuchungen ergibt sich die Notwendigkeit eines angepassten Projection-Mapping-Verfahrens für die Projektionsstabilisierung. Dabei stellt die Messung des Strukturier-ten Lichts die Grundlage für die Anpassung dar, welche pixelweise unter Berücksichtigung vorhandener und fehlender Punkte berechnet wird. In den nachfolgenden Abschnitten wird der Gesamtprozess in den einzelnen Schritten vorgestellt.

7.3.1. Grundzustand

Die Berechnung wird aufgesetzt auf der bereits erfolgten Bewegungskompensation und der damit transformierten Symbolprojektion. Hierbei wurde von einer ebenen Fahrbahn im Projektionsbereich, parallel zum Horizontierten KS ausgegangen. Um die Darstellung bei unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen konstant zu halten, muss im ersten Schritt bekannt sein, wie die gewünschte Sicht im Idealfall ist. Diese Darstellung ist abhängig



(a) Fahrersicht

(b) Beifahrersicht

Abbildung 7.12.: Vergleich einer Bodenprojektionsdarstellung aus Fahrer- und Beifahrersicht

von der direkten Rückprojektion der einzelnen Lichtstrahlen über die Fahrbahn in das Auge des Fahrzeugführers. Über die Annahme einer ebenen Fahrbahn, der berechneten Pose des Scheinwerfers sowie seiner bekannten Projektionseigenschaften kann im ersten Schritt für jeden Pixel im aktuellen Bildarray der Auftrittspunkt auf die theoretisch vorliegende Fahrbahn berechnet werden.

Im darauffolgenden Schritt wird der Strahlengang der Rückreflektion von der Fahrbahn in das Auge des Fahrzeugführers berechnet. Hier gibt es zwei Gestaltungsmöglichkeiten: Die Festsetzung einer statischen und durchschnittlichen Augenposition in der Fahrgastzelle oder das Tracking der Augenposition über eine zusätzliche Fahrerüberwachung im Innenraum.

Betrachtet man die Variation der Augenposition bei möglichen Scheinwerferpositionen, so zeigt sich, dass sich die Veränderung in der Darstellung in Grenzen hält. Als Beispiel ist in Abbildung 7.12 eine Bodenprojektion aus Sicht des Fahrzeugführers im Vergleich zum Beifahrer aufgezeigt.

Aus diesem Grund kann in den meisten Fällen von einer statischen Betrachterposition für die Berechnungen ausgegangen werden. Sind diese Strahlengänge berechnet, ist für jeden Pixel des Bildarrays der Betrachtungswinkel im Horizontierten KS bekannt. Die beiden Teilschritte der Berechnung sollen im Einzelnen betrachtet werden:

Scheinwerfer-zu-Fahrbahn

Der Scheinwerfer kann als inverse Kamera mit zugehöriger Projektionsmatrix $M_{proj,Scheinwerfer}$ definiert werden. Diese kann als Annäherung äquivalent zu Abschnitt 7.2.1 mit verringerter Genauigkeit oder exakter über eine vollständige intrinsische Kalibration [Moreno und Taubin, 2012] erfolgen.

Ist nun zusätzlich die Position und Orientierung des Scheinwerfers in Bezug zur idealen Fahrbahn aus der Dynamikberechnung bekannt, kann für jeden Pixel ein 3D-Punkt auf der Fahrbahn berechnet werden. Dazu kann eine Ebenenbeschreibung der Fahrbahn im Scheinwerferkoordinatensystem aufgestellt und anschließend der jeweilige Schnittpunkt mit den einzelnen Scheinwerferstrahlen berechnet werden.

Dadurch ergibt sich für den dreidimensionalen Projektionspunkt p' :

$$P' = p^T \times M_{proj,Scheinwerfer} \quad (7.12)$$

Ist dieser Punkt nun bekannt, kann im nächsten Schritt die Wirkung auf den Fahrzeugführer berechnet werden.

Fahrbahn-zu-Auge

Für das Auge kann eine theoretische Projektionsmatrix ähnlich einer Kamera entworfen werden, um Pseudo-2D-Punkte zu berechnen. Das Auge kann dabei als Lochkamera modelliert werden, mit der durchschnittlichen Brennweite von 2 cm:

$$M_{proj,Auge} = \begin{bmatrix} f' & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,02 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.13)$$

Der 3D-Punkt aus dem vorherigen Schritt wird dann einfach mit der Projektionsmatrix multipliziert, um den 2D-Punkt zu erhalten:

$$p'' = M_{proj,Auge} \times P' \quad (7.14)$$

Mit diesem Punkt ist nun die Zuordnung zwischen p und p'' bekannt, also welcher Pixel der Scheinwerferprojektion in welchem Sichtbereich des Auges wahrgenommen wird. Diese Information wird in den nachfolgenden Schritten verwendet, um auf Basis der Fahrbahntextur die erforderliche neue Position der einzelnen Bildabschnitte zu berechnen.

7.3.2. Fahrbahnerkennung

Im zweiten Schritt werden die berechneten Strahlengänge und die Tiefenrekonstruktion der Fahrbahn genutzt, um die Abweichung der aktuellen Situation vom Idealzustand zu berechnen. Da keine geschlossene Form der Oberflächenbeschreibung vorliegt werden für jeden Punkt p'' im Auge die drei Punkte A , B und C aus der Punktwolke herausgesucht, welche sich am nächsten am Sichtstrahl befinden. Die Geradengleichung dieses Lichtstrahls wird durch die Projektion des Augepixels p'' über die Projektionsmatrix des Auges $M_{proj,Auge}$ bestimmt. In Abbildung 7.13 ist das Vorgehen an einem vereinfachten Beispiel dargestellt.

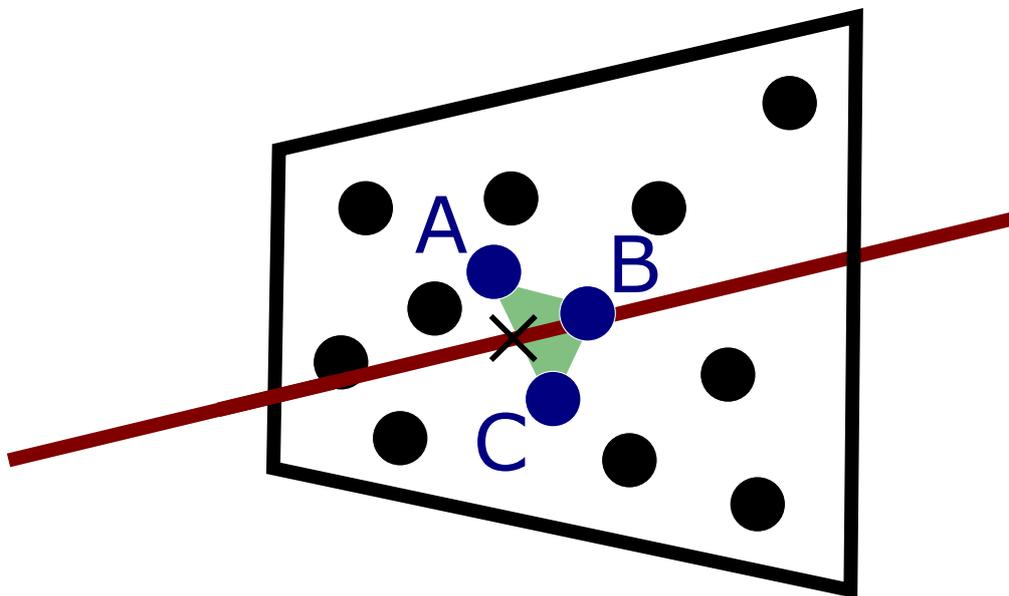


Abbildung 7.13.: Sichtstrahl (rot) und die drei am nächsten liegenden Punkte (Blau)

7. Bildverarbeitung

Die dreidimensionalen Koordinaten des Auftreffpunktes auf der Oberfläche werden anschließend auf dieser Basis abgeschätzt: Zwischen den drei aus der Punktwolke extrahierten Punkten wird eine Ebene aufgespannt, welche als Auftrittsfläche definiert wird.

$$E : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \vec{OA} + \lambda \vec{AB} + \mu \vec{AC} \Leftrightarrow E : a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = 0 \quad (7.15)$$

Anschließend wird der Schnittpunkt P'' des Sichtstrahls mit dieser Ebenenbeschreibung berechnet.

Um fehlende Detektionspunkte der 3D-Rekonstruktion zu berücksichtigen, kann eine maximale Distanz dieser Detektionspunkte zum Sichtstrahl festgelegt werden. Können in dieser Distanz nur zwei Punkte detektiert werden, findet die Bestimmung von P'' über die lotrechte Projektion zur Gerade zwischen diesen beiden Punkten statt. Kann nur ein Punkt detektiert werden, findet die Bestimmung über die direkte lotrechte Projektion zum Punkt statt. Ist kein Punkt detektierbar, so wird direkt der Punkt P' aus Abschnitt 7.3.1 weiterverwendet und $P'' = P'$ festgesetzt. Damit wird von einer unveränderten Fahrbahn in diesem Punkt ausgegangen.

Alternativ werden ungeachtet des Abstandes immer die drei Detektionspunkte mit der geringsten Distanz verwendet und zur Ebenenbildung genutzt. Der Vorteil dieses Vorgehens besteht darin, dass jeder Bildpixel betrachtet und transformiert wird, womit Artefakte durch eine nur teilweise erfolgreiche Anpassung vermieden werden. Der Nachteil ist jedoch eine fehlerhafte Anpassung durch die ungenaue Fahrbahndetektion.

Der Einfluss auf die Anpassung wird am Beispiel von Schwellen auf der Fahrbahn dargestellt. In Abbildung 7.14 sind zwei identische Schwellenaufbauten dargestellt, bei welchen im Zwischenbereich keine Punkte detektiert wurden. Je nach Berechnungsvariante ergeben sich unterschiedliche Rekonstruktionen, wie in rosa dargestellt, bei welchen sich entweder eine geteilte oder durchgängige Schwelle ergibt.

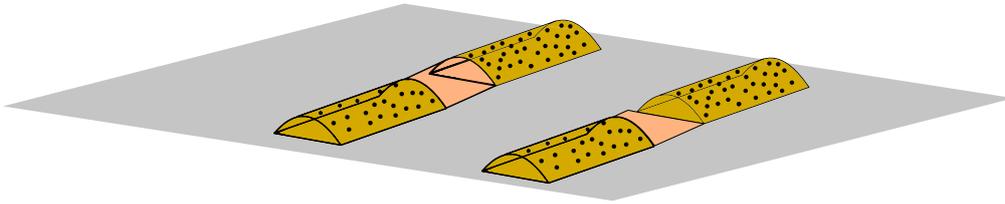


Abbildung 7.14.: Vergleich der beiden Rekonstruktionsvarianten am Beispiel einer Schwel- lendetektion

Unabhängig von der genauen Ausgestaltung der Berechnung dient dieser Punkt P'' nun als Zielcoordinate, auf welche der Scheinwerfer den ursprünglichen Pixel p mit seinem Helligkeitswert H projizieren muss.

7.3.3. Bildberechnung

Im letzten Schritt wird der berechnete 3D-Punkt über das inverse Kameramodel zurück in das Bildarray des Scheinwerfers projiziert. Damit wird über die vorhandene Scheinwerferkalibration berechnet, welcher Pixel p_{neu} nun den Helligkeitswert des ursprünglichen Pixels p bekommen muss.

$$p_{neu} = M_{proj,Scheinwerfer} \cdot P'' \quad (7.16)$$

Dabei wird die Zuordnung hierarchisch stufenweise vorgenommen:

1. Es werden alle neuen Punkte p_{neu} bestimmt.
2. Zu jedem Pixel des Bildarrays wird der Punkt p_{neu} mit der geringsten Distanz zugeordnet. Dabei werden nur Abstände unter einem halben Pixel akzeptiert.
3. Nicht zugeordnete Punkte p_{neu} werden zum nächsten noch freien Pixel zugeordnet, solange die Distanz unter einem Pixel ist. Dabei werden zuerst alle Abstände bestimmt und anschließend mit aufsteigender Distanz zugeordnet. Sollte der Pixel inzwischen besetzt sein, erfolgt keine Zuordnung
4. Nicht zugeordnete Punkte p_{neu} werden zum nächsten Pixel zusätzlich zugeordnet.

7. Bildverarbeitung

5. Der resultierende Helligkeitswert und die Projektionsdistanz der einzelnen Pixel werden über eine Gewichtung der Einzelhelligkeiten der zugeordneten Punkte über die jeweilige Distanz berechnet. Ist nur ein Punkt zugeordnet, erfolgt eine direkte Übernahme des Helligkeitswerts und der Distanz.
6. Sollten freie Pixel ohne zugeordnete Punkte überbleiben, werden hier die Helligkeiten und Distanzen über eine Interpolation der Helligkeiten der Nachbarpixel berechnet.

Der Ablauf der Pixelzuordnung ist grafisch in Abbildung 7.15 aufgezeigt.

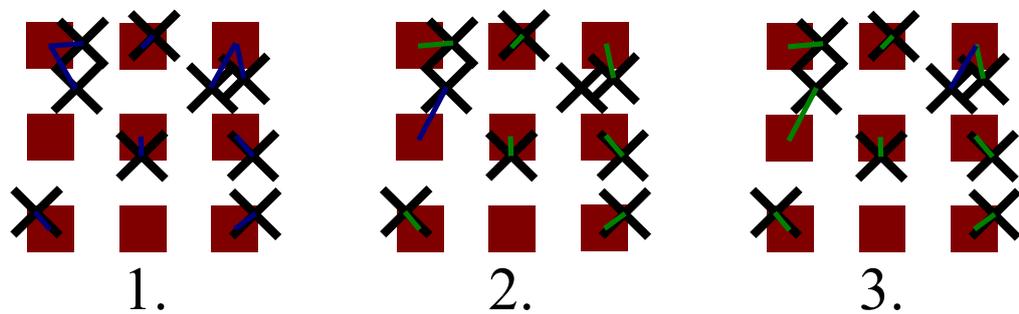


Abbildung 7.15.: Ablauf der Pixelzuordnung

Bevor die Helligkeitswerte endgültig zugeordnet werden, wird zusätzlich über den berechneten Distanzunterschied und die damit einhergehende Dämpfung des Lichts, die Helligkeit des Pixels angepasst.

$$H(p_{\text{neu}}) = \left(\frac{r_{\text{neu}}}{r_{\text{alt}}} \right)^2 \cdot H(p) \quad (7.17)$$

Somit erhält man für jeden Pixel einen neuen Helligkeitswert, womit das zu projizierende Lichtbild für das Bildarray erstellt wird.

8. Projektionsstabilisierung

Nachdem in Kapitel 6 die Dynamik der Scheinwerfer ausgewertet und in Kapitel 7 die notwendige Anpassung des digitalen Bildes hergeleitet wurde, sollen diese Komponenten zu einem System der Projektionsstabilisierung vereinigt werden. Die Hauptaufgabe der Stabilisierung kann dabei zeitlich und funktional in jeweils zwei Phasen aufgeteilt werden.

Diese entsprechen in der zeitlichen Abfolge

1. Der Bestimmung der Fahrzeug- und Fahrbahnsituation und
2. Der entsprechenden Anpassung des ausgestrahlten Symbols,

wobei die Anpassung in

1. Die Kompensation der Fahrzeugdynamik und
2. Das Projection Mapping

eingeteilt werden kann. Diese funktionale Gruppierung wird schematisch in Abbildung 8.1 aufgezeigt.

In den kommenden Abschnitten werden diesem funktionalen Aufbau entsprechend zuerst die Kompensation der Scheinwerferdynamik präsentiert und anschließend die Anpassung an die Fahrbahnstruktur aufgezeigt.

8.1. Kompensation der Fahrzeugdynamik

Wie aufgezeigt wurde, ist die Projektionsstabilisierung hierarchisch aufgebaut, wobei die Kompensation der dynamischen Scheinwerferbewegungen im Bezug zur Fahrbahn sowohl funktional als auch in der Abfolge priorisiert abgehandelt wird. Die Rotation des Scheinwerfers wird dabei unabhängig

8. Projektionsstabilisierung

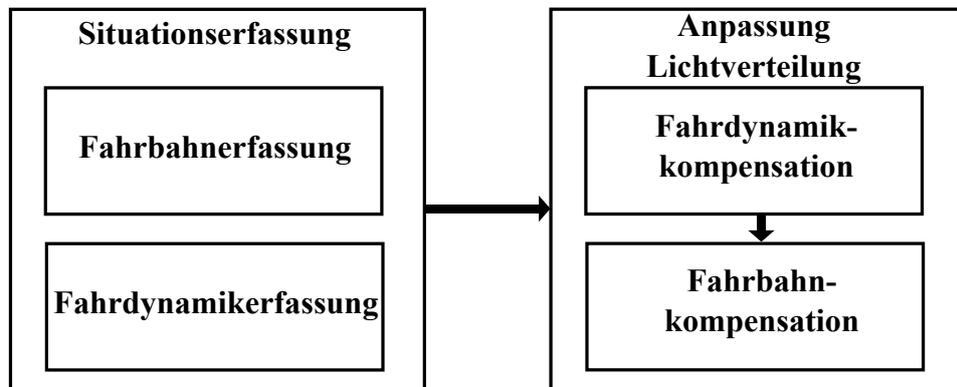


Abbildung 8.1.: Zeitlicher und funktionaler Ablauf der gesamten Projektionsstabilisierungsalgorithmik

von der Hubbewegung bestimmt. Nachdem beide Werte bestimmt wurden, wird das ausgestrahlte Lichtbild für eine entsprechende Kompensation angepasst.

8.1.1. Scheinwerferrotationen

Als erster Schritt wird der aktuelle Nick- und Wankwinkel des Scheinwerfers bestimmt, da diese auch die Grundlage für die Hubberechnung darstellen. Basierend auf den Untersuchungen in Abschnitt 6.2 werden die Bewegungen des Fahrzeugs mit der zur Verfügung stehenden Sensorik erfasst. Es erfolgt eine Einteilung der Messung in zwei Anteile: Der Bestimmung durch die LWR auf Basis des verbauten Accelerometers als Hauptsensor, sowie einer Bestimmung auf Grundlage des Gyroskops durch die Nick- und Wankprädiktion als auch einer zusätzlichen Filterung der Rohsensormesswerte.

LWR-Anteil

Wie in Abschnitt 6.3 hergeleitet wurde, liegt nun eine direkte Beziehung zwischen den Messwerten des Beschleunigungssensors und dem Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs vor:

$$a_{zlinear} = (x_0 + x_1 \cdot a_{xSF} + x_2 \cdot a_{xSF}^2) \cdot a_{xlinear} - (x_3 + x_4 \cdot a_{ySF}) \cdot a_{ylinear} + x_5 + a_{xlinear} \cdot v_{xHZ}^2 \cdot x_6 \quad (8.1)$$

Durch eine Subtraktion der bereits berechneten Erdgravitation und Inertialkräfte kann die lineare Beschleunigung a_{linear} bestimmt und die Koeffizienten der Gleichung über eine lineare Regression bestimmt werden. Dabei wird eine Gradient-Descent mit Momentum-Faktor verwendet.

Regression Durch die Regression werden die Koeffizienten stetig beim Eingang neuer Sensormesswerte aktualisiert. Diese Anpassung basiert auf der Differenz des aktuellen Modells zum tatsächlichen Messwert der linearen Beschleunigung in z-Richtung $a_{zlinear}$. Zu diesem Zweck wird der Feature-Vektor in jedem Zeitschritt festgelegt und aktualisiert zu:

$$F = \begin{pmatrix} a_{xlinear} \\ a_{xlinear} \cdot a_{xSF} \\ a_{xlinear} \cdot a_{xSF}^2 \\ -a_{ylinear} \\ -a_{ylinear} \cdot a_{ySF} \\ 1 \\ a_{xlinear} \cdot v_{xHZ}^2 \end{pmatrix} \quad (8.2)$$

Multipliziert man diesen Vektor mit dem Koeffizientenvektor

$$X = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} \quad (8.3)$$

so erhält man die inferierte Beschleunigung in z-Richtung

8. Projektionsstabilisierung

$$a_{zinf} = F^T \cdot X \quad (8.4)$$

Dieser Wert muss nach unserem Modell dem aktuellen Messwert $a_{zlinear}$ entsprechen. Durch Fehler in den Koeffizienten bzw. Änderungen des Fahrwerksverhaltens kommt es jedoch zu einem Fehler

$$E = a_{zinf} - a_{zlinear} \quad (8.5)$$

Über diesen Fehlerwert kann nun bestimmt werden, um welchen Wert die einzelnen Koeffizienten verändert werden müssten, um den Fehler E zu beseitigen:

$$\delta X[n] = E \cdot F \quad (8.6)$$

Um die grundsätzliche Lernrichtung auch bei kurzzeitig fehlerbehafteten Daten oder während durch die Modellierung nicht abgefangenen Beschleunigungssituationen beizubehalten, wird ein Momentum-Faktor M eingeführt. Dieser sorgt dafür, dass vergangene Delta-Werte berücksichtigt werden, und wirkt wie eine Art Tiefpassfilter. Die tatsächlichen neuen Delta-Koeffizienten können damit berechnet werden zu

$$\delta X[n] = M \cdot \delta X[n - 1] + (1 - M) \cdot \delta X[n]. \quad (8.7)$$

Abschließend wird mit dieser Information der Koeffizientenvektor über die Lernrate L aktualisiert:

$$X[n + 1] = X[n] - L \cdot \delta X[n] \quad (8.8)$$

Um ein Abdriften der berechneten Koeffizienten während extremen Fahrmanövern zu verhindern, wird in der Implementierung die Aktualisierung einzelner Koeffizienten dynamisch gesteuert. So erfolgt ein Update der Nick- und Wankkoeffizienten nur bei Längs- und Querschleunigungen über einem festgelegten Schwellwert, um evtl. bestehende restliche Sensorfehler sowie die Nichtlinearität des Fahrwerks um den Nullpunkt auszugleichen.

Ebenso werden die Koeffizienten nicht aktualisiert, falls eine zu hohe Zentripetalkraft vorliegt, um das System robust gegenüber der Variation der Cross-Axis-Sensitivity des Sensors zu gestalten.

Sind die Koeffizienten bekannt, kann nun mithilfe der Sensor-Rohmesswerte der aktuelle Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs bestimmt werden zu

$$\Theta = x_0 + x_1 \cdot a_{xSF} + x_2 \cdot a_{xSF}^2 + x_6 \cdot v_{xHZ}^2 \quad \text{bzw.} \quad \Phi = x_3 + x_4 \cdot a_{ySF} \quad (8.9)$$

Stillstandskompensation Die Lage des Fahrzeugs und damit der Scheinwerfer kann sich auch im Stand verändern. In diesen Situationen liegt jedoch keine Beschleunigung vor, weshalb die Änderungen nicht direkt erfasst werden können. Für die Projektionsdarstellung sind diese Verdrehungen zwar nicht sehr relevant, da in diesen Situationen nur Animationen dargestellt werden, welche in der Darstellung robust gegenüber dem statischen Nick- und Wankwinkel ausgelegt sind, aber dennoch soll auch dieser Einfluss kompensiert werden.

Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Stillstandskompensation integriert, welche diese Änderungen während des Fahrzeugstillstands verfolgen soll. Zu diesem Zweck werden die Messwerte des Sensors als Inclinometer verwendet und die Richtung der Erdgravitation im Sensor KS beobachtet. Daraus kann direkt der aktuelle Nick- und Wankwinkel bestimmt werden.

Um den Bias-Drift des Sensors auszugleichen, wird dabei die Tatsache ausgenutzt, dass die Nick- und Wankbewegungen im Stillstand durch Beladungsänderungen verursacht werden, welche vergleichsweise schnell und stufenweise ablaufen. Es wird ein maximaler Änderungswinkel festgelegt, der in einem Zeitraum von einer Sekunde erfolgen kann, ohne dass dies durch eine Beladungsänderung erfolgt ist. Wird dieser Wert unterschritten, liegt ein stabiler Zustand des Systems vor und der Durchschnittswert wird abgespeichert. Tritt nun im nächsten Zeitschritt eine Überschreitung der Schwelle ein, wird dies als aktuell laufende Beladungsänderung klassifiziert und der abgespeicherte Durchschnittswert nicht überschrieben. Ist dieser Vorgang vorbei und es liegt erstmals wieder ein Zeitraum mit einem stabilen Zustand vor, wird der Durchschnittswert ermittelt und die Differenz

8. Projektionsstabilisierung

zum letzten Speicherwert berechnet. Diese entspricht der erfolgten Nick- bzw. Wankwinkeländerung und wird durch eine Anpassung der statischen Koeffizienten x_0 bzw. x_3 übernommen.

Um einen Einfluss des temperaturbasierten Bias-Drifts zu minimieren und evtl. fehlerhafte Überschreitungen des Schwellwerts bei schnellen Temperaturänderungen zu vermeiden, wird eine zusätzliche linearisierte Bias-Kompensation über den Wert des im Inertialsensor integrierten Temperatursensors und des vom Hersteller zur Verfügung gestellten Temperaturkoeffizienten durchgeführt.

In Testdurchläufen des Systems hat sich gezeigt, dass es beim erneuten Anfahren des Fahrzeugs zu zusätzlichen Nickänderungen kommt, die aufgrund der vorliegenden Geschwindigkeit $v > 0$ nicht von der Stillstandskompensation abgefangen werden. Diese entstehen durch Verspannungen im Fahrwerk, welche durch das Blockieren der Räder im Stand durch die Fahrzeugbremsen verursacht werden. Fängt das Fahrzeug wieder an loszufahren, so werden die Bremsen gelöst, die Räder können sich wieder frei bewegen und das Fahrwerk entspannt, wodurch sich eine Änderung im statischen Nickwinkel ergibt.

Aus diesem Grund wird über die Stati der Fahrzeugtüren überprüft, ob eine Beladungsänderung stattfinden kann oder ob die Änderungen im Stillstand durch Verspannungen verursacht wurden. Zusätzlich wird dies abgeprüft über den Zustand der Park- und Betriebsbremse. Auch bei Beladungsänderungen, die bei aktivierter Bremse erfolgen, wird ein fahrzeugspezifischer Spannungsfaktor festgelegt. Basierend auf diesem Faktor wird nach einem erneuten Anfahren des Fahrzeugs ein gewisser Teil der aufgezeichneten Nickänderungen gegenkompensiert.

Sensorkalibrierung In der Produktion des Fahrzeugs wird das Steuergerät mit dem darauf befindlichen Inertialsensor mit der Fahrzeugkarosserie verschraubt. Dabei können Orientierungsfehler von bis zu $\pm 3\%$ in den jeweiligen Rotationsachsen entstehen. Diese Orientierungsfehler führen zu einem direkten Fehler der Nick- und Wankwinkelbestimmung, da von einem rotatorisch kongruenten Sensor und Fahrzeugfesten KS ausgegangen

wird. Damit wird die Fehlorientierung als statischer Nick- und Wankwinkel interpretiert.

Aus diesem Grund wird eine Selbstkalibrierung des Inertialsensors umgesetzt. Diese erfolgt über die Koeffizienten x_0 und x_3 , welche den statischen Nick- und Wankwinkel abbilden und dadurch auch die Fehlstellung des Sensors miterfassen. Die Selbstkalibration wird dabei direkt nach der Fahrzeugproduktion gestartet und läuft, bis die interne Abbruchbedingung erreicht wird. Diese ist über die Änderung der Koeffizienten in vergangenen Zeitabschnitten mit einer Beschleunigung über $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ definiert. Haben sich die Koeffizienten nicht stärker als ein Schwellwert w in den vergangenen 4, 8, 16, 32 und 64 Sekunden-Zeitabschnitten verändert, wird die Kalibration beendet. Der Koeffizient x_0 wird als Nickwinkel und der Koeffizient x_3 als Wankwinkel des Sensor KS zum Fahrzeugfesten KS eingespeichert. Diese Werte werden ab diesem Zeitpunkt verwendet, um die Sensormesswerte ins Fahrzeugfeste KS zu verdrehen. Abschließend werden die Koeffizienten auf null gesetzt und die LWR geht in den Standardbetrieb über.

Um die LWR-Funktionalität während dieser Kalibration aufrecht zu erhalten, wird das Modell initial mit vortrainierten Koeffizienten x_0 bis x_7 geladen, auf deren Basis die Nick- und Wankwinkelberechnung während des Kalibrationsvorgangs abläuft.

Ergebnisse Um das Verhalten des angepassten LWR-Systems zu evaluieren, sind verschiedene Testfahrten durchgeführt worden. Dabei wurden zum Vergleich die Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs zusätzlich mit Achssensoren erfasst und mitgezeichnet.

In Abbildung 8.2 ist ein herausforderndes Testszenario dargestellt: Das System startet mit untrainierten Koeffizienten, die eine fehlerhafte Beschreibung über die Grundausrichtung des Fahrzeugs und des dynamischen Verhaltens liefern. Dadurch liegt von Anfang an ein Offset zum Achssensor-Signal vor. Im Laufe der Zeit werden die internen Koeffizienten durch die Regression aktualisiert, wodurch sich die Messwerte annähern. Etwa zur Hälfte der Messung ist der Offset vollständig antrainiert und auch das dynamische Verhalten ist angelernt, sodass beide Kurven nahezu deckungsgleich verlaufen. Zu beachten ist, dass das System durch seine Lernparameter auf Robustheit

8. Projektionsstabilisierung

ausgelegt ist und der Lernvorgang dementsprechend mehrere Minuten betragen kann. Dies liegt jedoch an dem hohen Initialoffset, welcher im alltäglichen Einsatz des Fahrzeugs nicht auftreten wird - das Fahrwerksverhalten des Fahrzeugs variiert nur sehr langsam über mehrere Jahre. Außerdem kann der Lernvorgang, wenn gewünscht, durch starke Brems- und Beschleunigungsvorgänge auf wenige Sekunden reduziert werden.

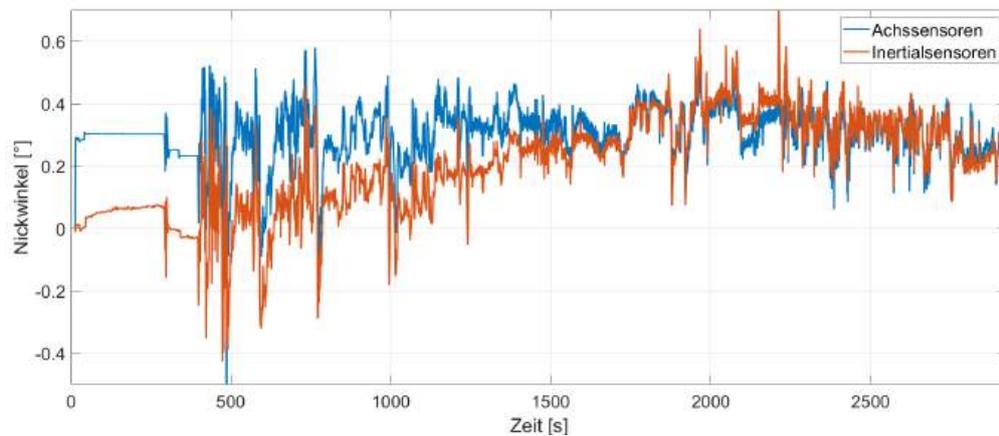


Abbildung 8.2.: Zeitlicher Verlauf des Nickwinkelsignals berechnet über die Fahrzeugachsensensoren und der neu aufgestellten Algorithmmik über die Inertialsensoren

Um die Qualität der Ergebnisse zu evaluieren, wird der berechnete Winkelwert über verschiedene Metriken mit den Achssensorenwerten abgeglichen. Eine Beschreibung der einzelnen Fehlermetriken ist in Anhang A hinterlegt. In Abbildung 8.3 sind drei Metriken anhand einer Beispielfahrt mit gemischten Stadt-, Land- und Autobahnfahrten dargestellt.

Wie zu erkennen ist, bleibt der Fehler stets unter $0,1^\circ$ und somit unter der für eine Leuchtweitenregulierung kritischen Schwelle. Erweitert man die Betrachtung auf einzelne Zeitbereiche über den Situationsfehler, sinkt dieser Wert sogar deutlich unter den Wert von $0,05^\circ$. Dies kann erklärt werden durch den geringeren Dynamikumfang der Achssensoren, wodurch in hochdynamischen Situationen große Differenzen an einem diskreten Zeitpunkt entstehen können.

In diesem Zusammenhang ist nicht zu vergessen, dass die Achssensorenwerte nicht den realen Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs darstellen

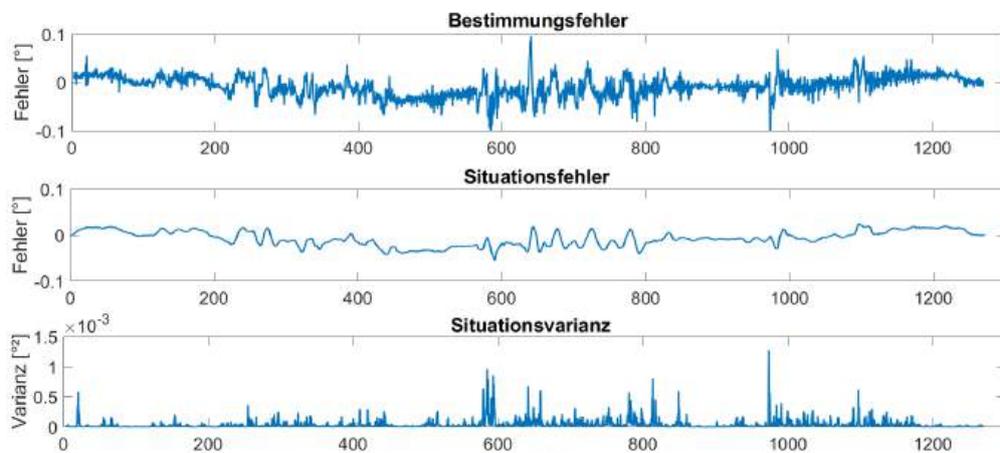


Abbildung 8.3.: Zeitlicher Verlauf der Metriken 1 bis 3 am Beispiel einer ausgewählten Mischfahrt

und fehlerbehaftet sind. In statischen Situationen sind die Werte jedoch bis auf den Quantisierungsfehler der Winkelgeber und der Reifenverformung genau. Damit eignen sie sich vor allem für einen Vergleich über gesamte Einzalfahrten. Die durchschnittliche Gesamtvarianz über alle Messungen beträgt beim Nickwinkel nur $5e^{-04}$ und beim Wankwinkel $6,4e^{-04}$, womit die gewünschte Nick- und Wankwinkelerfassung durch unseren Algorithmus bestätigt werden kann.

Dynamischer Nick- und Wankwinkel

Der dynamische Nick- und Wankwinkel beinhaltet Signalkomponenten hoher Frequenz und ist damit für die Kompensation der dynamischen Bewegungen hauptsächlich verantwortlich. Um diese zu beachten, werden die Rohmesswerte des Drehratensensors über eine Filterung in einen resultierenden Nick- und Wankwinkel überführt. Um zusätzlich die Sensorlatenz des Inertialsensors auszugleichen, wird die bereits vorgestellte Nick- und Wankprädiktion in die Berechnungen integriert.

Drehratensensor Wie in Kapitel 2.2.4 aufgezeigt, bietet der Drehratensensor eine direkte Messung der tatsächlichen Drehbewegung der Karosserie, unabhängig von dem Einbauort. Zur Extraktion der relevanten Bewegungskomponenten wird dabei eine Bandpassfilterung auf die Rohsensormesswerte angewendet.

Diese hat das Ziel, die unerwünschten Signalkomponenten im nieder- und hochfrequenten Bereich herauszufiltern. Im niederfrequenten Bereich betrifft dies vor allem den Sensor-Bias und im hochfrequenten Bereich die Rauschkomponenten.

Die relevanten niederfrequenten bzw. statischen Komponenten der Nick- und Wankwinkeländerungen werden bereits wie in Abschnitt 6.4 aufgezeigt durch die LWR detektiert und durch den verbauten Schrittmotor im Fahrzeug kompensiert. Aus diesem Grund ist nur eine Extraktion der hochdynamischen Komponente erforderlich, weshalb die Tiefpasseckfrequenz vergleichsweise hoch gewählt werden kann, entsprechend Abschnitt 6.4.

Für die Filterung wird dabei ein EMA-Filter verwendet, welcher aufgrund seiner geringen Phasenverschiebung eine gute Eignung für die hochdynamischen Komponenten aufweist. Die Berechnung erfolgt dabei über eine gewichtete Addition des neuen Sensormesswerts $x[n]$ mit dem vergangenen Filterwert $y[n - 1]$ zu

$$y[n] = \beta \cdot y[n - 1] + (1 - \beta) \cdot x[n] \quad (8.10)$$

Dabei wird über den Faktor β die Eckfrequenz f_G der Filterung umgesetzt. Mithilfe der Datenrate DR des Sensors kann er berechnet werden zu

$$\beta = \exp\left(\frac{-2\pi \cdot f_G}{DR}\right). \quad (8.11)$$

Eine Hochpassfilterung z kann über eine Subtraktion des tiefpassgefilterten Signals y von den Messwerten x bestimmt werden:

$$z[n] = x[n] - y[n] \quad (8.12)$$

Somit wird das bandpassgefilterte Signal ω_{BP} über zwei Tiefpassfilterungen ω_{TP} bestimmt zu

$$\omega_{BP} = \omega_{TP,20Hz} - \omega_{TP,2Hz} \quad (8.13)$$

Auf Basis dieser Drehrate kann nun der relative Nick- und Wankwinkel seit Start der Messungen über eine Integration berechnet werden zu

$$\begin{aligned} \Theta_{dyn}[n] &= \Theta_{dyn}[n-1] + \frac{\omega_{BP_y}[n]}{DR} \text{ bzw.} \\ \Phi_{dyn}[n] &= \Phi_{dyn}[n-1] + \frac{\omega_{BP_x}[n]}{DR} \end{aligned} \quad (8.14)$$

Werden diese berechneten Winkel direkt für die Kompensation verwendet, entstehen jedoch Ungenauigkeiten bei der Ausregelung. Bei einer Aufbau- bewegung der Fahrzeugkarosserie erfolgt die Zunahme des resultierenden Winkels vergleichsweise langsam und nur schrittweise. Damit wird durch das integrierte Winkelsignal auch nur sehr langsam der Fehlstellung entgegen gewirkt, was durch die Latenz der Sensorsignale zu einer versetzten und zu langsamen Kompensation führt. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird am Beispiel des Nickwinkels ein Summensignal Θ_{res} aus dem Nick- winkel Θ und zusätzlich der um den Zeitfaktor T gewichteten Drehrate ω_{BP_y} gebildet:

$$\Theta_{res} = \Theta_{dyn} + T \cdot \omega_{BP_y} \quad (8.15)$$

Bei einer Änderung des Fahrzeugnickwinkels liegt somit direkt eine ent- sprechende Drehrate vor, welche bereits der Fehlstellung entgegenwirkt, bevor eine signifikante Fehlstellung bestimmt werden kann. Ein beispielhaf- ter schematischer Signalverlauf ist in Grafik 8.4 aufgezeigt.

Diese Summation hat den weiteren Vorteil, dass zusätzlich einem Über- schwingen des Fahrwerks nach der eigentlichen Anregung entgegenwirkt

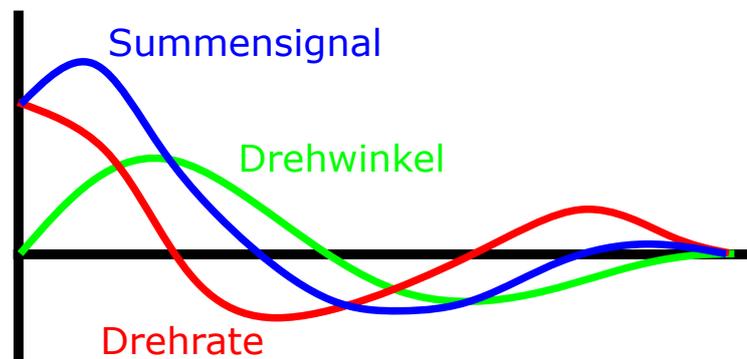


Abbildung 8.4.: Darstellung eines beispielhaften Winkel- und Drehratenverlaufs mit resultierendem Summensignal

wird und somit Schwingungen abgedämpft werden. Das exakte Stabilisierungsverhalten kann dabei durch den Drehratenparameter T gesteuert werden, um die Schwingungen zu minimieren. Dabei wird der tatsächliche Betrag heuristisch und abhängig vom Systemverhalten bestimmt. Dennoch kann ein fester Parameter ausgewählt werden, da die Inertialsensor- und Scheinwerferlatenzen beinahe konstant sind.

Nick- und Wankprädiktion In Kapitel 5 wurde eine Prädiktion der Nick- und Wankbewegungen aufgestellt, um die Systemlatenz im Fahrzeug auszugleichen. Das Ergebnis dieser Prädiktion ist eine Nickwinkeländerung $\delta\Theta$ und Wankwinkeländerung $\delta\Phi$, welche bis zum Prädiktionszeitpunkt stattfinden wird. Dabei kann das Modell beliebig erweitert werden, um mehrere Prädiktionszeitpunkte zur Verfügung zu stellen.

Damit ist rein mathematisch eine direkte Kompensation der Scheinwerferbewegungen bereits im Voraus möglich. Um jedoch den durch die Prädiktion eingeführten Fehler möglichst gering zu halten, wird die tatsächlich verwendete Prädiktionszeit reduziert und auf $t_{\text{praed}} = 30 \text{ ms}$ beschränkt. Zusätzlich wird aufgrund der unbekanntenen Latenz keine direkte Kompensation durchgeführt, sondern die prädizierten Werte in Gleichung 8.1.1 integriert. Dafür wird die durch die Prädiktion bestimmten Winkeländerungen $\delta\Theta$ und $\delta\Phi$ in eine durchschnittliche Drehrate transformiert:

$$\omega_{\Theta,praed} = \frac{\delta\Theta}{t_{praed}} \quad \text{bzw.} \quad \omega_{\Phi,praed} = \frac{\delta\Phi}{t_{praed}} \quad (8.16)$$

Um den Einfluss der weiteren Schwingungskomponenten der Karosserie zu beseitigen, müssen auch diese Werte bei 20 Hz tiefpassgefiltert werden. Um die Phasenverschiebung im Vergleich zu den Sensormesswerten aus Abschnitt 8.1.1 konstant zu halten, wird das Signal ebenfalls von 2 bis 20 Hz bandpassgefiltert zu $\omega_{BP,praed}$. Für die Integration des Signals in die resultierende Winkelbestimmung wird die Drehrate der Prädiktion verwendet, um die direkten Sensormesswerte des Sensors zu unterstützen. Dazu wird der Mittelwert zwischen dem gefilterten Prädiktionssignal und der gefilterten Rohdrehrate gebildet und in Gleichung 8.1.1 eingefügt:

$$\Theta_{res} = \Theta_{dyn} + T \cdot \frac{\omega_{BP_y} + \omega_{BP,praedy}}{2} \quad (8.17)$$

Zusammengesetzte Nick- und Wankbewegung Nachdem die einzelnen Komponenten der Dynamik bestimmt wurden, müssen diese Werte nun zu einem von der Projektionsstabilisierung verwertbaren Winkel kombiniert werden.

Dabei muss zwischen der Nick- und Wankkomponente unterschieden und beide unterschiedlich gehandhabt werden. Das liegt daran, dass der LWR-Anteil der aktuellen Nickbewegung bereits vollständig mechanisch über den verbauten Schrittmotor und über die bestehende LWR-Funktionalität umgesetzt wird. Damit muss dieser Wert nicht für die Projektionsstabilisierung beachtet werden. Dennoch hat die Bewegung einen Einfluss auf die Hubsituation im Fahrzeug, weshalb zwei unterschiedliche Nickbeschreibungen jeweils für die Rotationskompensation und die Hubkompensation erstellt werden müssen.

Dadurch entstehen die drei Winkelbeschreibungen der rotatorischen Nickkompensation Θ_{rot} , der translatorischen Nickkompensation Θ_{trans} und der gemeinsamen Wankkompensation Φ_{ges} .

8. Projektionsstabilisierung

$$\begin{aligned}\Theta_{rot} &= \Theta_{dyn} + T \cdot \frac{\omega_{BP_y} + \omega_{\Theta,praed}}{2} \\ \Theta_{trans} &= \Theta + \Theta_{dyn} + T \cdot \frac{\omega_{BP_y} + \omega_{\Theta,praed}}{2} \\ \Phi_{ges} &= \Phi + \Phi_{dyn} + T \cdot \frac{\omega_{BP_x} + \omega_{\Phi,praed}}{2}\end{aligned}\tag{8.18}$$

Θ_{rot} und Φ_{ges} werden damit als Eingangssignal für die Rotationskompensation der Projektionsstabilisierung verwendet.

8.1.2. Hubbewegung

Die Hubbewegung in der Scheinwerferposition setzt sich aus den drei verschiedenen Komponenten des Karosseriehubens und dem rotationsinduzierten Nick- und Wank-Huben zusammen. Dabei können alle drei vollständig entkoppelt voneinander betrachtet werden, da diese sich nicht gegenseitig beeinflussen.

Karosserie-Huben Das Karosseriehuben wird dabei über Messwerte des Beschleunigungssensors über das Fahrdynamikmodell bestimmt. Die Berechnung erfolgt über dasselbe Fahrwerksmodell wie bereits für den LWR-Anteil der Rotationen, indem der Offset durch Subtraktion der restlichen Komponenten bestimmt wird:

$$\begin{aligned}s'' &= a_{zlinear} - (x_0 + x_1 \cdot a_{xSF} + x_2 \cdot a_{xSF}^2) \cdot a_{xlinear} \\ &\quad + (x_3 + x_4 \cdot a_{ySF}) \cdot a_{ylinear} - a_{xlinear} \cdot v_{xHZ}^2 \cdot x_6\end{aligned}\tag{8.19}$$

Dadurch kann zu jedem Zeitpunkt mit neuen Messwerten der Inertialsensoren die Hubbeschleunigung s'' bestimmt werden. Dieses Signal wird entsprechend der Erkenntnisse aus Abschnitt 6.4 zwischen 0,5 und 10 Hz zum Signal s''_{BP} bandpassgefiltert. Um daraus den Wert der Hubbewegung

zu erhalten, muss dieser zweifach integriert werden, erst zur Hubgeschwindigkeit

$$s'[n] = s'[n - 1] + \frac{s''_{BP}[n]}{DR} \quad (8.20)$$

und anschließend zur Hubstrecke

$$s[n] = s[n - 1] + \frac{s'[n]}{DR} \quad (8.21)$$

Nicken- und Wanken Über die bekannten Abmaße des Fahrzeugs und der relativen Positionierung der Lichtmodule im Vergleich zur Inertialsensorposition bzw. dem Rotationszentrum des Fahrzeugs kann die rotationsbedingte Scheinwerfertranslation bestimmt werden. Bei der Nickbewegung erfahren beide Scheinwerfer dieselbe Auslenkung, bei der Wankbewegung ist diese entgegengesetzt.

Die nickinduzierte Hubbewegung δz_{nick} ist abhängig von der longitudinalen Scheinwerferdistanz d_x zum Rotationszentrum. Da im fahrzeugfesten KS ein positiver Nickwinkel ein Abtauchen zur Folge hat, ergibt sich

$$\tan(\Theta_{trans}) = \frac{-\delta z_{nick}}{d_x} \Leftrightarrow \delta z_{nick} = -\tan(\Theta_{trans}) \cdot d_x \quad (8.22)$$

bei einer Wankbewegung. Durch die symmetrische Anbauposition von Scheinwerfern muss der Betrag der Auslenkung dennoch nur einmal berechnet werden. Über die Distanz zur d_y zur Längsachse des Fahrzeugs kann die Auslenkung δz_{wank} bestimmt werden zu

$$\tan(\Phi_{ges}) = \frac{\delta z_{wank}}{d_y} \Leftrightarrow \delta z_{wank} = \tan(\Phi_{ges}) \cdot d_y \quad (8.23)$$

Dabei gelten für die Auslenkungen des linken ($z_{wank,L}$) und rechten ($z_{wank,R}$) Scheinwerfers

8. Projektionsstabilisierung

$$z_{wank,L} = z_{wank} \quad z_{wank,R} = -z_{wank} \quad (8.24)$$

Zusammengesetzte Hubbewegung Nachdem alle Komponenten der Hubbewegung hergeleitet und beschrieben wurden, können diese nun zu einer resultierenden Hubbewegung für jeden Scheinwerfer zusammengefasst werden. Dabei werden die Einzelkomponenten für jeden Scheinwerfer zusammenaddiert und man erhält für den linken Scheinwerfer

$$z_L = s + z_{nick} + z_{wank} \quad (8.25)$$

und für den rechten Scheinwerfer

$$z_R = s + z_{nick} - z_{wank} \quad (8.26)$$

Damit ist zusammen mit den Nick- und Wankwinkeln aus Abschnitt 8.1.1 für jeden Scheinwerfer die relative Rotation und Translation zum Grundzustand bekannt, welche für die Anpassung der Lichtverteilung benötigt werden.

8.2. Messungen

Mit dem vorgestellten Testsystem aus Abschnitt 2.7 werden nun Testmessungen durchgeführt, um die Ergebnisse der entwickelten Projektionsstabilisierung aufzuzeigen und die in den vorangegangenen Kapiteln aufgestellten Überlegungen zu verifizieren. Dazu werden verschiedene Szenarien mithilfe des Versuchsträgers nachgefahren und die Ergebnisse ohne und mit aktivierter Stabilisierung verglichen. Dabei wird zeitgleich dasselbe Symbol aus jeweils einem Scheinwerfer projiziert, mit einer aktivierten Stabilisierung im linken und einer deaktivierten Stabilisierung im rechten Scheinwerfer. Die Projektionen werden dabei über die am Fahrzeug angebrachte Kamera aufgezeichnet.

Da kein Ground Truth Signal zur Verfügung steht, ist eine quantitative Untersuchung der Stabilisierung nicht trivial durchzuführen. Da die Wirkung auf die Fahrzeuginsassen jedoch ohnehin subjektiv evaluiert werden muss, ist eine qualitative Auswertung in dieser Entwicklungsphase ausreichend. Aus diesem Grund erfolgt die Evaluation über den Kamerafeed, welcher anhand von Merkmalspunkten in der Umgebung stabilisiert wird. Dadurch wird die straßenfixierte Blickführung der Fahrzeuginsassen möglichst nah am Fahrempfinden rekonstruiert.

8.2.1. Dynamikkompensation

Der erste Teil der betrachteten Projektionsstabilisierung umfasst die Kompensation der Scheinwerferbewegungen. Dabei wird die Qualität der Stabilisierung in den zwei Hauptaspekten der Eigendynamik des Fahrzeugs und dem Einfluss von verschiedenen Fahrbahnanregungen evaluiert.

Eigendynamik

Hauptanregungen der Eigendynamik sind zum einen Brems- und Beschleunigungsvorgänge, welche ein Nicken des Fahrzeugs verursachen, sowie Kurvenfahrten, welche ein Wanken des Fahrzeugs verursachen. Zur Evaluation werden deshalb diese Situationen im Folgenden näher betrachtet.

Beschleunigen/Bremsen Als Erstes soll die Nickkompensation evaluiert werden, wozu ein Bremsvorgang durchgeführt wird. Einzelbilder der Projektionsdarstellung sind in Abbildung 8.5 dargestellt.

Im Vergleich zum Grundzustand in Bild 1 ist die deutlich verringerte Reichweite der rechten, nicht stabilisierten Projektion zu erkennen. Diese wird verursacht durch das Bremsnicken des Fahrzeugs, welches zu einem positiven Nickwinkel und einem leichten Absinken der Scheinwerferposition führt. Die Projektionsstabilisierung kompensiert in der linken Projektion die Auswirkungen auf die Darstellung auf der Fahrbahn, indem das Symbol auf der Bildmatrix nach oben verschoben wird. Somit bleibt die Entfernung

8. Projektionsstabilisierung



Abbildung 8.5.: Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion bei einem Bremsvorgang

der Projektion zur Fahrzeugfront zu jedem Zeitpunkt konstant. Sichtbar ist jedoch der begrenzte vertikale Projektionsbereich der Scheinwerfer: Die ursprünglich oberste Horizontallinie des Symbols verschwindet in Folge der Verschiebung und kann nicht mehr dargestellt werden.

Kurvenfahrt Als Nächstes wird zusätzlich die Hubkompensation während einer Kurvenfahrt betrachtet. Hierzu wird für eine bessere Vergleichbarkeit die Wankkompensation der Projektionsstabilisierung ausgeschaltet. In Abbildung 8.6 ist der zeitliche Verlauf der Symbolprojektion dargestellt.

Das Video ist auf Basis der Umgebungspunkte bewegungsstabilisiert worden, um einen Vergleich zwischen den einzelnen Frames leichter zu gestalten. Zusätzlich ist eine statische Horizontallinie in rot als Referenz eingeblendet. Deutlich zu sehen ist in Bild 2 das Eintauchen der rechten Symbolprojektion im Vergleich zum Grundzustand in Bild 1. Dies liegt an der durch die Kurvenfahrt verursachten Hubbewegung der Scheinwerfer. Wie zu sehen ist, wird diese Hubbewegung durch die Projektionsstabilisierung im linken Scheinwerfer kompensiert und die Darstellung bleibt auf demselben Niveau. In Bild 3 ist eine Beschleunigungsphase des Fahrzeugs während der Kreisfahrt dargestellt, bei der im Fahrzeug eine zusätzliche Nickbewegung induziert wird. Diese hat zur Folge, dass die rechte Scheinwerferprojektion über die Referenzlinie wandert. Die Projektionsstabilisierung ist in der Lage, beide Einflussquellen auf die Scheinwerferposition zu erfassen und auszugleichen.

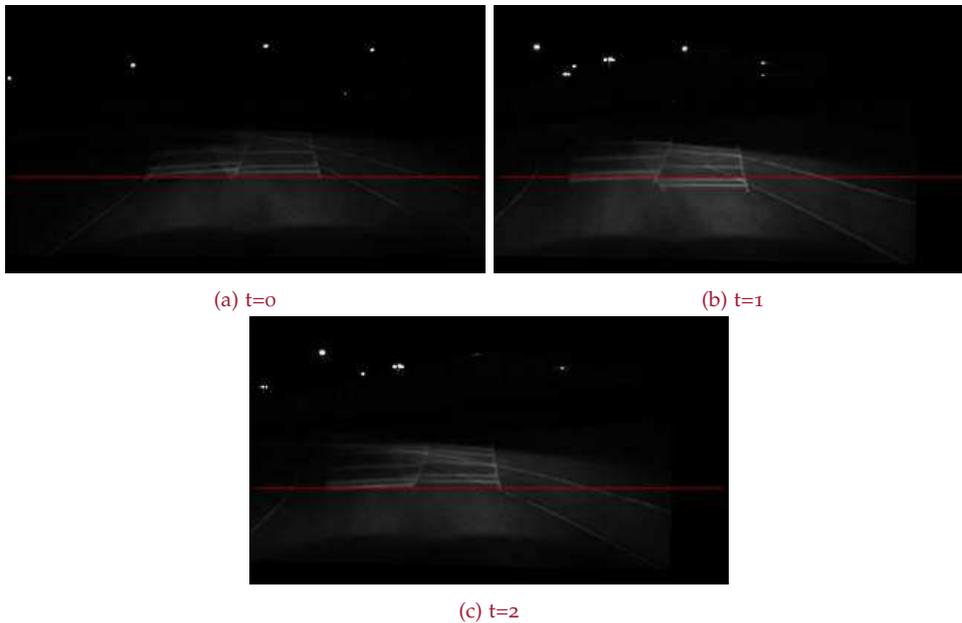


Abbildung 8.6.: Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion im stabilisierten Videobild bei der Fahrt durch eine Kurve. Eine zusätzliche rote Horizontallinie ist als Referenz eingefügt.

Wankausgleich Als nächster Schritt wird die Wankkompensation dazugeschaltet und eine stationäre Kreisfahrt durchgeführt, die dazugehörigen Aufnahmen sind in Abbildung 8.7 dargestellt.

Beim Übergang in die stationäre Kreisfahrt zwischen den Bildern 1 bis 3 ist die deutliche Verdrehung der linken Scheinwerferprojektion zu sehen, welche der Fahrbahntrajektorie folgt. Dadurch wird die Wankbewegung des Fahrzeugs zum Kurvenäußeren, wie in der rechten Projektion zu sehen ist, ausgeglichen. Diese Anpassung bleibt anschließend bei den Bildern 4 und 5 während der stationären Fahrt erhalten und wird beim Stand in Bild 6 wieder ohne bleibende Verstellung zurückgesetzt. Damit zeigt sich die Robustheit der aufgestellten Stabilisierung gegenüber Sensorfehlern des Inertialsensors wie Bias oder Cross-Axis-Sensitivity.

8. Projektionsstabilisierung

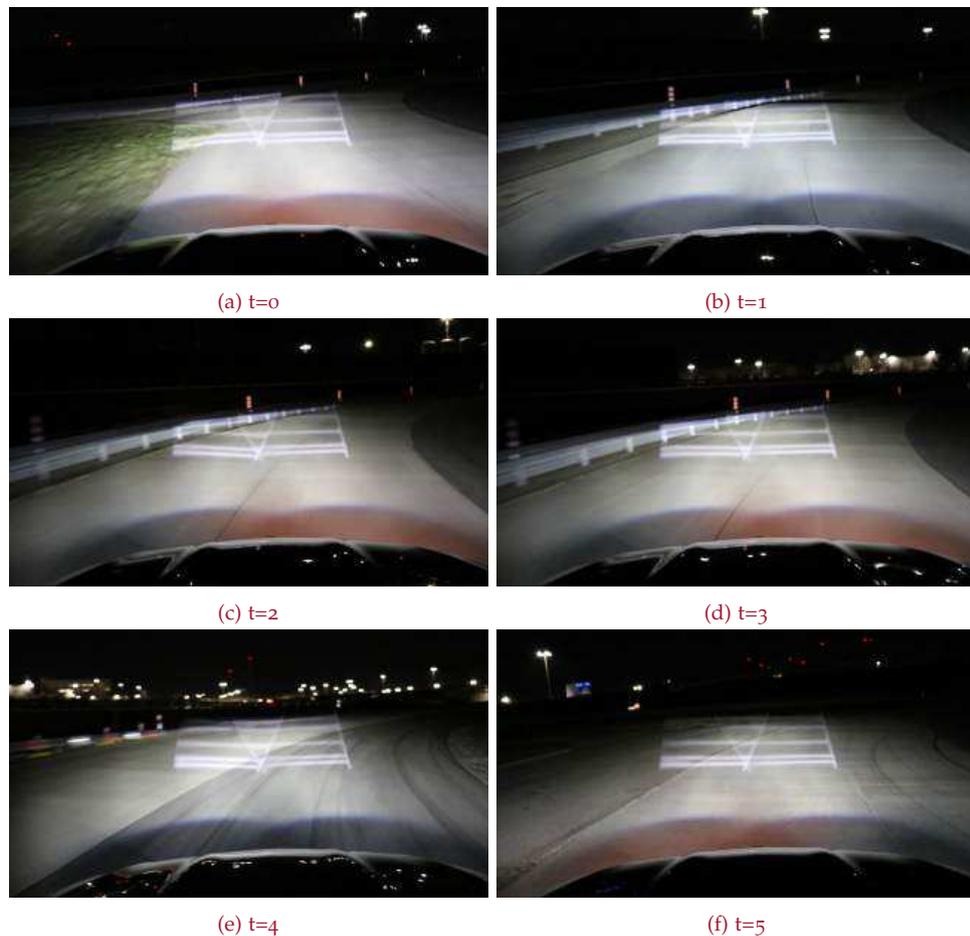


Abbildung 8.7.: Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion bei einer stationären Kreisfahrt

Fahrbahnanregungen

Nachdem die durch die Eigendynamik des Fahrzeugs verursachten Verschiebungen und Verdrehungen betrachtet wurden, werden nun die Auswirkungen verschiedener Arten von Fahrbahnanregung betrachtet und die Ergebnisse der Projektionsstabilisierung untersucht.

Schwellen Eines der wichtigsten Anwendungsfälle stellen hierbei wie zuvor diskutiert Geschwindigkeitsschwellen dar, da diese zu einer hochdy-

namischen und betragsmäßig großen Anregung führen. Einzelne Frames der stabilisierten Videoaufnahme einer Schwellenüberfahrt sind in Abbildung 8.8 dargestellt.

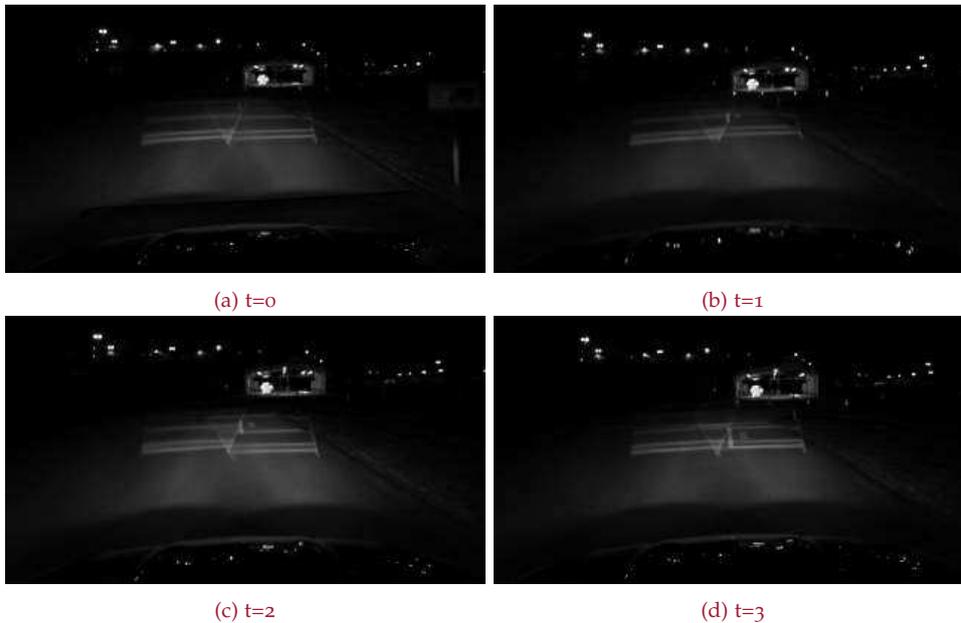


Abbildung 8.8.: Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion bei der Überfahrt einer Geschwindigkeitsschwelle

In Bild (a) ist der Grundzustand der Projektionen dargestellt. Sobald die Vorderachse des Fahrzeugs die Schwelle anfängt, die Schwelle zu überfahren, kommt es zu einer Erhöhung der Scheinwerferposition und einem negativen Nickwinkel. Das Ausmaß der Verschiebung ist jedoch siehe Bild (b) geringer als vielleicht intuitiv zu erwarten wäre, da ein Großteil des initialen Schocks durch die Dämpfer des Fahrzeugs abgefangen wird. Anders sieht es jedoch in der darauffolgenden Entlastungsbewegung aus, bei der siehe Bild (c) die Fahrzeugfront abtaucht und damit die Projektion verschoben wird. In beiden Fällen ist die Projektionsstabilisierung im linken Scheinwerfer jedoch in der Lage, die Verschiebungen auszugleichen.

Bodenwelle Die möglicherweise auffälligsten Verschiebungen und Verzerrungen der Scheinwerferprojektionen werden durch Bodenwellen auf

8. Projektionsstabilisierung

der aktuellen Fahrspur verursacht. Diese sind oft langgezogen und damit niederfrequent, können somit zu einem großen Teil nicht durch das Feder-Dämpfer-System des Fahrzeugs abgefangen werden. In Abbildung 8.9 sind Einzelbilder einer Bodenwellenüberfahrt mit einer Horizontallinie als Referenz dargestellt.

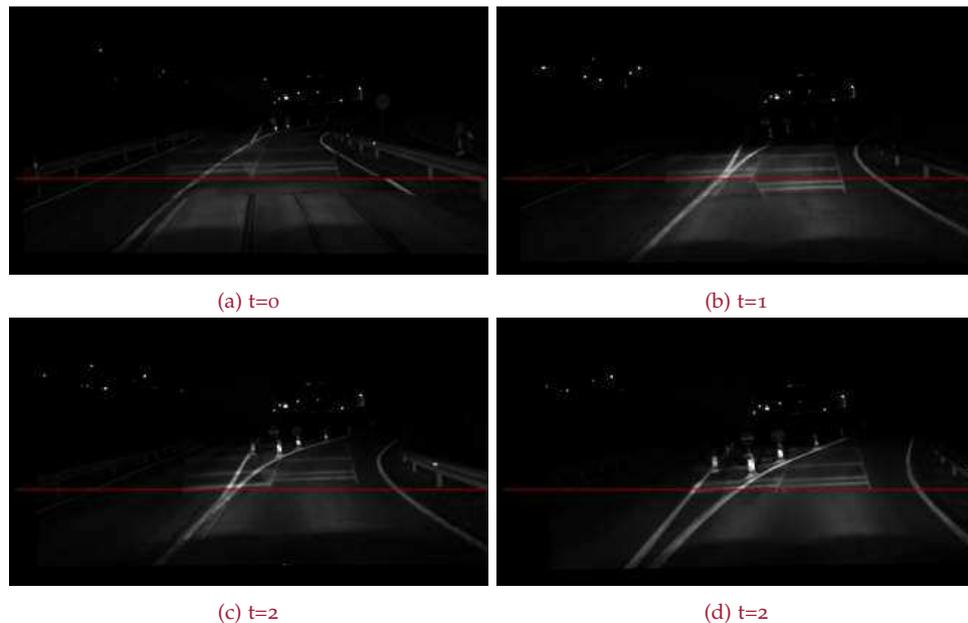


Abbildung 8.9.: Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion im stabilisierten Videobild bei der Überfahrt einer Bodenwelle. Eine zusätzliche rote Horizontallinie ist als Referenz eingefügt

In Bild (a) ist der Grundzustand der Projektionen dargestellt. Während der Überfahrt kommt es zu einem leichten Abstieg der Fahrbahn und somit zu einem Abtauchen der Fahrzeugfront im Vergleich zur Fahrbahnebene im Projektionsbereich. Dies führt zu einer entsprechenden Verringerung der Projektionsweite durch den unstabilisierten Scheinwerfer siehe Bild (b), wohingegen die Projektionsstabilisierung für eine Erhaltung der Leuchtweite sorgt, im Austausch für einen Teilverlust des oberen Projektionsbereichs. Anschließend kommt es zu Ausschwingbewegungen des Fahrwerks, sichtbar in Bild (c), was sich auch in der unstabilisierten Projektion widerspiegelt. Auch hier ist die Projektionsstabilisierung im linken Scheinwerfer in der Lage, die Verschiebungen zu einem großen Teil auszugleichen und die

Projektion auf dem Referenzniveau zu halten.

Defekte Fahrbahn Die schnellsten Änderungen der Scheinwerferlage werden durch Fahrbahndefekte, wie Schlaglöcher und Querrillen, verursacht, da sie eine unstetige Änderung der Fahrbahnhöhe zur Folge haben. Um das Verhalten der Projektionsstabilisierung unter diesen Gegebenheiten zu untersuchen, wird ein vorbereiteter Testabschnitt mit mehreren aufeinanderfolgenden Schlaglöchern befahren. In Abbildung 8.10 sind Einzelbilder der Fahrt mit einer Horizontallinie als Referenz dargestellt.

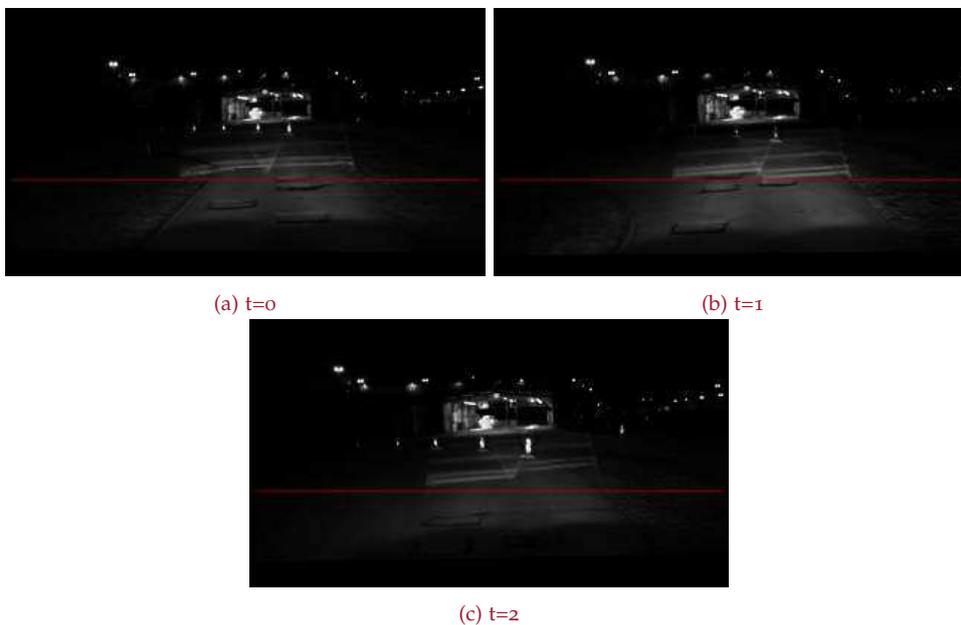


Abbildung 8.10.: Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion im stabilisierten Videobild bei der Überfahrt einer defekten Fahrbahn. Eine zusätzliche rote Horizontallinie ist als Referenz eingefügt.

In Bild (a) ist der Grundzustand der Projektionen dargestellt. Während der Überfahrt kommt es zu stetigen Anregungen des Fahrwerks durch die Geschwindigkeitsschweller und somit zu einer Vielzahl an verschiedenen Nick-, Wank- und Hubbewegungen, abhängig davon, welches Rad durch Schlaglöcher hindurchfährt. In Abbildungen (b) und (c) sind zwei ausgewählte Momentanzustände dargestellt. In (b) ist die durch die Nick- und

8. Projektionsstabilisierung

Hubsituation die rechte Projektion zum Fahrzeug hin verschoben. Diese Differenz kann durch die aktive Projektionsstabilisierung im linken Scheinwerfer kompensiert werden. In (c) jedoch ist die Kompensation aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Einflusskomponenten und der hohen Dynamik nicht mehr vollständig in der Lage, die longitudinale Verschiebung auszugleichen. Dennoch ist erkennbar, dass dem Wankeinfluss, also der Verdrehung des Symbols, und der durch das Huben verursachte Ausweitung des Symbols korrekt entgegengewirkt wird.

Steigungshügel Als Letztes wird die Projektionsstabilisierung bei starken und schnellen Änderungen der Fahrbahnneigung betrachtet. Dazu wird die Fahrt über einen Steigungshügel mit 40 % maximaler Fahrbahnneigung herangezogen. In Abbildung 8.11 sind Einzelbilder der Überfahrt mit einer Horizontallinie als Referenz dargestellt.

Während der Auffahrt von Abbildung (a) bis (c) ist auf den ersten Blick zu erkennen, dass kein großer Unterschied zwischen der unstabilisierten und stabilisierten Projektion vorliegt. Schaut man sich Abbildung (b) jedoch genauer an, fällt auf, dass die stabilisierte Scheinwerferprojektion fälschlicherweise zur Fahrzeugfront hin verschoben wird. Dies liegt daran, dass trotz der im Algorithmus vorgenommenen Vorkehrungen ein Teil der durch die Fahrbahnneigungsänderungen induzierten Fahrzeugdrehbewegungen als Nickbewegung der Fahrzeugkarosserie interpretiert wird. Auch in der Abfahrt lässt sich dasselbe Verhalten für sehr kurze Augenblicke feststellen, wie in Abbildungen (d) und (f) zu sehen ist.

8.2.2. Projektions-Mapping

Aufbauend auf der Dynamikkompensation wendet die Projektionsstabilisierung wie aufgezeigt ein fahrbahnspezifisches Projection-Mapping an. Dieses wird am Beispiel verschiedener Projektionsflächen evaluiert, wobei als Testtextur ein Baggersymbol verwendet wird.

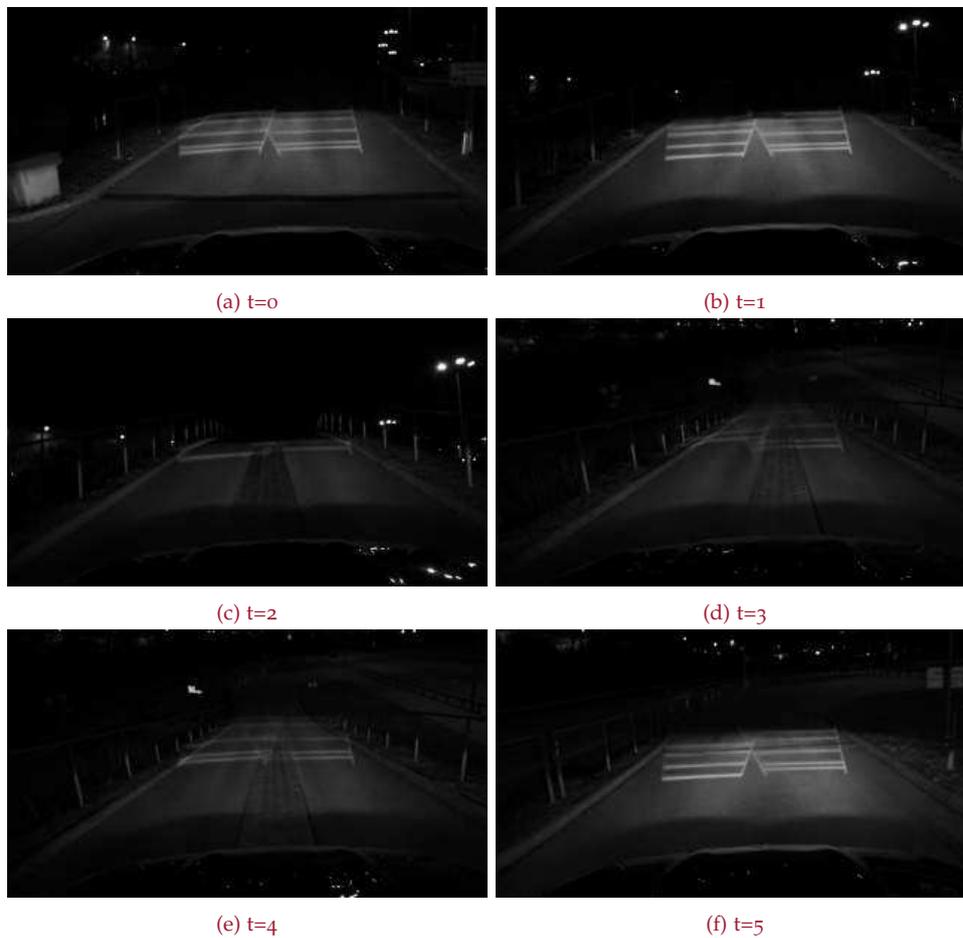


Abbildung 8.11.: Zeitlicher Verlauf der Symbolprojektion bei der Überfahrt eines Steigungshügels

Fahrbahnunebenheiten

Als Erstes wird die Projektion am Beispiel kleinflächiger Unebenheiten betrachtet, wozu eine stark beschädigte Fahrbahn verwendet wird. Die Projektion hierauf aus Sicht des Fahrzeugführers ist in Abbildung 8.12 aufgezeigt.

Es zeigt sich, dass die Projektionsdarstellung nicht durch die Fahrbahn beeinträchtigt wird und die Anpassung der Projektion nicht evaluiert werden

8. Projektionsstabilisierung



Abbildung 8.12.: Symbolprojektion auf einer stark beschädigten Fahrbahn mit großen Unebenheiten

kann. Kleine Ungenauigkeiten in der Fahrbahn spielen also keine Rolle für die Sichtbarkeit von Symbolen, weshalb auch keine Anpassung vorgenommen werden muss.

Objekte

Da kleine Unebenheiten zu keinen sichtbaren Verzerrungen der Symbolprojektion führen, werden nun die Auswirkungen von Fremdobjekten im Frontbereich des Fahrzeugs betrachtet.

Geschwindigkeitsschwellen Das erste Objekt ist eine übliche Geschwindigkeitsschwelle. Die Symbolprojektion hierauf ist in Abbildung 8.13 dargestellt. Erneut zeigt sich, dass die Fahrbahnunebenheit keinen sichtbaren Einfluss auf die Projektionsdarstellung aufweist und deshalb eine Projektionsanpassung nicht notwendig und damit auch eine Auswertung nicht möglich ist.



Abbildung 8.13.: Symbolprojektion auf eine Geschwindigkeitsschwelle

Steigungshügel Als nächstes wird ein Steigungshügel betrachtet, welcher eine starke Fahrbahnkrümmung mit relevanten Höhenänderungen im Projektionsbereich aufweist. Die Symbolprojektion mit und ohne PM ist in Abbildung 8.14 aufgezeigt.



(a) Ohne PM

(b) Mit PM

Abbildung 8.14.: Symbolprojektion auf einen Steigungshügel vor und nach der Anpassung durch das Projection Mapping

Die durch den Steigungshügel verursachte Symbolverzerrung in (a) kann durch die Anpassung der Symbolprojektion (b) kompensiert werden, so dass die ursprüngliche Darstellung wiederhergestellt wird. Zu beachten ist jedoch, dass eine spezielle seitliche Lage des Versuchsträgers ausgewählt

wurde. Das Fahrzeug ist dabei im Uhrzeigersinn um die Hochachse zur Projektionsfläche rotiert, um eine sichtbare Verzerrung zu forcieren. Mit einer parallelen Ausrichtung des Fahrzeugs konnte im gleichen Szenario nur eine Stauchung der Symboldarstellung erzeugt werden, welche nur einen geringfügigen Einfluss auf die Darstellung hat.

8.3. Fazit

Es zeigte sich, dass die Dynamikkompensation in den meisten Situationen eine fast vollständige Wiederherstellung der Projektionsdarstellung erreicht. Sowohl Nickbewegungen als auch Wanksituationen und das Huben werden wie ausgelegt über den Algorithmus erfasst und kompensiert. Dabei wird eine subjektiv deutlich angenehmere Darstellung erreicht, da schnelle und plötzliche Bewegungen der Projektionen weitestgehend getilgt werden.

Eine Ausnahme bilden Drehbewegungen, induziert durch Fahrbahnneigungsänderungen, welche zu einer zeitweisen Fehlkompensation führen. Dies liegt an der geringen Dynamik der Erdgravitationserkennung, über welche dieser Fehler hätte kompensiert werden können. Hier sollte eine spätere Einbindung der Fahrbahninformationen über die Fahrbahnrekonstruktion in den Kalman-Filter Abhilfe schaffen können.

Das Mapping der Symbole an die Fahrbahn zeigt wiederum gemischte Ergebnisse: Aufgrund der Abhängigkeit der Berechnungen von vielen Signalkomponenten und der damit stattfindenden Fehlersummation können kleine und feine Strukturen nur sehr begrenzt in ihrer Wirkung auf die Darstellung kompensiert werden. Im Gegensatz hierzu zeigt die Anpassung an großflächige Verzerrungen der Symboldarstellung signifikante und gut sichtbare Verbesserungen, wodurch die ursprüngliche Darstellung rekonstruiert werden kann.

Dennoch ist diese Situation eine sehr seltene Ausnahme, die im normalen Fahralltag so gut wie nie auftritt. Die Sinnhaftigkeit einer Anpassung der Projektion an die Fahrbahnstruktur sollte deshalb Bestandteil weiterer Untersuchungen, vor allem im Bereich der psychovisuellen Wirkung, sein.

9. Zusammenfassung

Durch neue hochauflösende Lichtsysteme können neuartige Funktionen im Fahrzeug implementiert werden. Eine dieser Möglichkeiten ist die einseitige Kommunikation des Fahrzeugs mit den Insassen und seiner Umgebung durch das Aussenden von symbolartigen Lichtverteilungen auf die Fahrbahn, um über verschiedene Verkehrssituationen zu informieren oder Unterstützung im aktuellen Szenario zu liefern.

Diese Einblendungen sind jedoch in ihrer Form und Position äußerst anfällig gegenüber dynamischen Änderungen der Scheinwerferposition und der Beschaffenheit und Form der Projektionsfläche. Für eine robustere Projektion muss deshalb eine Stabilisierung des Symbols auf dem Zielort auf der Fahrbahn erfolgen. Im Rahmen der Arbeit wurde deshalb ein System entworfen, welches unter Verwendung der in den meisten Fahrzeugen vorhandenen Sensoriken eine Stabilisierung der Projektion ermöglicht. Dadurch kann das Konzept ohne größere Anpassungen und ohne direkte Materialkosten in relevante Fahrzeuge integriert werden.

Um diese Projektionsstabilisierung umzusetzen, wurde ein zweistufiges Verfahren implementiert, bei welchem im ersten Schritt der Einfluss der veränderten Scheinwerferpose auf die Projektionsdarstellung kompensiert wird. Anschließend erfolgt eine nachgelagerte und optionale Angleichung der Projektion an die Fahrbahnform und -struktur. Um die für diese Berechnungen benötigten Status- und Umgebungsinformationen zu bestimmen, wurden mehrere Subsysteme entworfen, welche Informationen zur Fahrbahn und Scheinwerferlage liefern.

Ein solches Subsystem ist für die Erfassung der Form und des Verlaufs der Fahrbahn zuständig, wozu ein komplett neuartiges Sensorsystem für Fahrzeuge entworfen wurde. In Zusammenarbeit von Scheinwerfer und Kamera und unter Verwendung bekannter und angepasster Verfahren des

strukturierten Lichts kann dieses die dreidimensionale Beschaffenheit der Fahrbahn im Projektionsbereich erfassen und damit eine Tiefenrekonstruktion durchgeführt werden. Bei den Evaluationen der Leistungsfähigkeit zeigte sich eine sehr hohe Genauigkeit im Subzentimeter-Bereich, vergleichbar mit dedizierten kommerziell erhältlichen Tiefenkameras, wodurch die Anforderungen für die Projektionsstabilisierung erfüllt werden.

Die wichtigste Komponente stellt jedoch das System für die Dynamikerfassung dar. Dabei werden unter Hinzunahme eines Fahrzeugmodells die dynamischen Fahrzeugbewegungen auf einer virtuellen Straßenebene bestimmt und in eine aktuelle Pose des Scheinwerfers umgesetzt. Für diese Erfassung werden dabei Inertialsensorinformationen bestehend aus einem Dreiachs-Beschleunigungs- und Dreiachs-Drehratensensor als Hauptquelle verwendet. Aufgrund der im Fahrzeugnetz vorliegenden Signallatenzen wurde zusätzlich eine Prädiktion der Drehratenmesswerte über eine Lineare Regression umgesetzt. Diese ist in der Lage, bis zu 50 ms in die Zukunft bei akzeptablen Fehlerbereichen die Drehwinkel des Fahrzeugs auszugeben, wobei in der Ausführungsvariante im verwendeten Versuchsträger Prädiktionen bis 30 ms verwendet werden.

Das aus vorherigen Arbeiten bekannte Fahrzeugmodell zur Nickwinkelberechnung des Fahrzeugs wurde erweitert, um die für die Projektionsstabilisierung relevanten Werte des Nick- und Wankwinkels sowie des Hubens zu inkludieren. Weiterhin wurde der Dynamikbereich in zwei Teile aufgeteilt, um die notwendige und bereits integrierte Leuchtweitenregulierung im Fahrzeug für die Stabilisierung mitzubeachten, ohne eine doppelte Kompensation durchzuführen. In Zusammenarbeit mit der Prädiktion und weiteren Sensordaten kann so die Scheinwerferlage durch den aufgestellten Algorithmus in Echtzeit berechnet werden.

Mit Hilfe der nun bekannten Scheinwerferlage und Fahrbahnstruktur wurde das zweischichtige Stabilisierungsverfahren für die Scheinwerferprojektionen implementiert. Dabei wird zuerst die Änderung der Scheinwerferpose durch eine Neuberechnung des auszustrahlenden Lichtbilds ausgeglichen. Im zweiten Schritt kann optional die Anpassung an die Fahrbahnbeschaffenheit dazugeschaltet werden. Dafür wird ein angepasstes Projektion-Mapping durchgeführt, welches auf dem berechneten Lichtbild der Dynamikkompensation eine pixelweise Anpassung durchführt, um die Wirkung auf die

Fahrzeuginsassen konstant zu halten. Um durch die Anpassung des projizierten Bildes verursachte Artefakte und Treppeneffekte zu vermeiden, wurde zusätzlich ein Bildverarbeitungsschritt eingebaut, welcher ein auf Computergrafikverfahren basierendes Anti-Aliasing implementiert.

Abschließend wurden Testmessungen des Systems mithilfe eines Versuchsträgers durchgeführt, in welchem die Gesamtalgorithmik integriert wurde. Die eingeführten Teilsysteme wurden dazu erfolgreich in ein Gesamtsystem vereinigt und in einem prototypischen Fahrzeugaufbau betrieben. In den Auswertungen zeigte sich, dass die Stabilisierung in Szenarien der eigenverursachten Dynamik sehr gute Ergebnisse liefert. Darüber hinaus wurden bei fahrbahninduzierten Bewegungen vor allem Verschiebungen niedriger Amplitude zufriedenstellend ausgeregelt. Damit führt das System zu subjektiv deutlich angenehmeren Projektionsbewegungen, bei welchen störende, schnelle Schwingungen und Verzerrungen zu einem großen Teil eliminiert werden. Bei starken Anregungen durch die Fahrbahn zeigte sich jedoch teilweise eine entsprechend zu geringe Kompensation beziehungsweise eine teilweise Fehlinterpretation der Fahrbahnneigungsänderungen.

Im Rahmen der Projektionsanpassung an die Fahrbahn wurden verschiedene Situationen betrachtet, bei welchen sich zeigte, dass die Anpassung nur in äußerst seltenen Randfällen Anwendung finden kann. Am Beispiel einer stark gekrümmten Fahrbahn wurde aber gezeigt, dass in solchen Fällen die Projektionsanpassung eine starke Verbesserung der Projektionssichtbarkeit herbeiführen kann.

10. Ausblick

Der Mehrwert einer Projektionsstabilisierung ist subjektiv deutlich erkennbar, jedoch sollte die bisher rein qualitativ erfolgte Bewertung der Gesamtstabilisierung um ein quantitatives Auswertungskonzept erweitert werden. Dennoch kann bereits jetzt auf eine Integration des Systems in das Serienprodukt und damit den Einsatz in Fahrzeugen im Feld abgezielt werden. Um dies zu realisieren, müssen jedoch einige Teilaspekte des aufgestellten Systems überarbeitet oder erweitert werden.

So darf der Vorgang der Fahrbahnrekonstruktion über das Strukturierte Licht nicht mehr für die Fahrzeuginsassen und andere Verkehrsteilnehmer sichtbar sein, da die Einblendungen zumindest störend sind und im schlimmsten Fall sogar nicht zugelassene Einblendungen darstellen. Hierzu wird wie im zugehörigen Kapitel angerissen die Implementierung des Musters in die PWM-Zyklen der einzelnen Projektions-LEDs empfohlen. In diesem Fall wären zusätzliche Anforderungen an die Synchronität zur Fahrerassistenzkamera erforderlich.

Ein wichtiger Punkt ist ebenfalls die Optimierung der durchgeführten Berechnungen. Im aktuellen Stand ist vor allem das Projection Mapping sehr rechenintensiv. Aber auch die für die Dynamikkompensation notwendigen Transformationen und Filtervorgänge benötigen zusätzliche Rechenschritte, die in der aktuellen Fahrzeugarchitektur nicht vorgesehen sind. Aus diesem Grund ist eine stärkere Hardware bzw. eine zusätzliche Recheneinheit notwendig, welche Zusatzkosten verursacht. Durch eine entsprechende Optimierung der Berechnungen und die Integration in das bestehende Rendering des hochauflösenden Lichtbilds kann das System mit einem geringeren Zuwachs an erforderlicher Rechenleistung implementiert werden.

Weiterhin erfolgte die Integration des Systems im Rahmen der Arbeit nur über einen prototypischen Aufbau mit einer abgekoppelten Fahrbahnrekon-

struktion durch das Strukturierte Licht. Für abschließende Untersuchungen wird deshalb eine Erweiterung des Systems mit einer Online-Berechnung aller Einzelkomponenten empfohlen. Hierdurch ist auch eine Erweiterung der Erkennung der Straßenneigungsänderung implementierbar, welche bei den Messfahrten durch unpassende Filterparameter nicht immer zufriedenstellend kompensiert werden konnte. In Zukunft könnte dann die Tiefenrekonstruktion dazu verwendet werden, die kommende Straßenneigungsänderung über den Straßenverlauf im Fahrzeugfrontfeld zu berechnen.

Abschließend erwies sich der breite Einsatz der Anpassung der Projektion an die Oberflächenstruktur der Fahrbahn aufgrund der Fehleranfälligkeit, des geringen Mehrwerts für die Darstellungsqualität und der Gefahr, Objekte dadurch zu übersehen, als fragwürdig. Hier müssen die einzelnen Einsatzszenarien in weiteren Untersuchungen ausführlich erarbeitet und einzeln untersucht werden, um den Einsatzbereich auf einen abgesicherten Umfang zu beschränken.

Aus diesem Grund wird für die initiale Ausführungsvariante eine alleinige Implementierung der Scheinwerferposekompensation empfohlen, welche mit gestiegenem Reifegrad um die Projektionsanpassung an die Fahrbahn erweitert werden kann.

Anhang

Anhang A.

Leuchtweitenregulierung

A.1. Prinzip

Ein in der Fahrzeugkarosserie angebrachter Inertialsensor kann keine direkten Messwerte zur Fahrzeuglage, bzw. konkrete Distanzen der Karosserie oder Scheinwerfer zu den Fahrzeugaufstandspunkten liefern. Aus den gemessenen Beschleunigungen und Drehraten kann kein direkter Wert zum aktuellen Neigungszustand der Fahrzeugkarosserie, und damit der Scheinwerfer, bestimmt werden. Dementsprechend muss ein Zusammenhang zwischen den Beschleunigungen und Drehraten des Fahrzeugscheinwerfers und des aktuellen Fahrzeugnickwinkels konstruiert werden, um ein System zur Leuchtweitenregulierung aufzustellen.

Das im Inertialsensor enthaltene Gyroskop kann Rotationen der Karosserie messen. Da die Fahrzeugkarosserie als starrer Körper angesehen werden kann, entspricht diese Rotation auch gleichzeitig der des Autos um die Sensorachsen. Durch diese Messwerte des Gyro-Sensors lassen sich somit die dynamischen Nickwinkeländerungen des Fahrzeugs bestimmen. Jedoch ist es nicht in der Lage, die absolute Nickwinkelsituation zu bestimmen.

Für diesen Zweck wird auf den Beschleunigungssensor zurückgegriffen. Ein Fahrzeug weist während einer Fahrt Bewegungen und damit auch Beschleunigungen parallel zur Fahrbahn auf. Ist die Fahrzeugkarosserie und somit der daran angebrachte Sensor genickt, so befindet sich das Sensorkoordinatensystem nicht mehr parallel zur Beschleunigungsebene auf der Fahrbahn und es erfahren verschiedene Sensorachsen einen Anteil der Beschleunigung.

Diese Anteile sind proportional zur Winkellage des Sensors, womit sich die Nick- und Wankwinkel bei bekannter Beschleunigung zurückrechnen lassen.

Jedoch ist die Messung der Beschleunigungssensoren durch verschiedene andere Komponenten zusätzlich zur reinen Fahrzeuglängsbeschleunigung überlagert. Um verschiedene Einflüsse wie Sensorfehler und externe Beschleunigungen auszugleichen sowie eine dynamische Berechnung zu ermöglichen, sind im nächsten Schritt ein darauf angepasstes Sensormessmodell und ein Fahrwerksmodell vonnöten.

A.2. Messmodell

Um eine Schätzung der Fahrzeuglage auf Basis der Beschleunigungsdaten aufstellen zu können, ist eine Beschreibung der Messwerte des Sensors nötig. Neben der Erfassung der tatsächlichen Fahrzeugbeschleunigungen, misst der Sensor auch weitere Komponenten, welche sich in drei Teile aufteilen lassen.

Die Erste ist die Gravitationsbeschleunigung, welche zu jeder Zeit vorliegt und von der Sensororientierung zum Erdbezugssystem abhängt. Diese ist anteilmäßig die größte der Fehlerkomponenten. Die zweite Komponente stellen die Trägheitsbeschleunigungen dar, welche dadurch verursacht werden, dass die genutzten Bezugssysteme des Straßen- und Fahrzeugkoordinatensystems keine Inertialsysteme darstellen. Sie werden verursacht durch die Coriolis-, Zentripetal- und Eulerkraft. Der letzte Anteil wird verursacht bei vom Ursprung des Bezugssystems abweichenden Anbaupositionen des Sensors. Bei Rotationen des Systems wirken durch diese Dislokation verschiedene Scheinbeschleunigungen.

Wie im Folgenden dargestellt lassen sich die von einem Inertialsensor gemessenen Beschleunigungskomponenten nun einzeln aufschlüsseln, basierend auf den in [Hover und Triantafyllou, 2010] aufgezeigten Untersuchungen und den in Abschnitt 2.2.3 definierten Koordinatensystemen, sowie einer Orientierung des physischen Sensors entsprechend dem Fahrzeugfesten KS:

A.2.1. Coriolisbeschleunigung

Die Coriolisbeschleunigung wird im Beschleunigungssensor verursacht durch die Drehrate der Erdrotation und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs im Vergleich zur Erdoberfläche. Die Coriolisbeschleunigung entspricht dabei dem zweifachen Kreuzprodukt zwischen der Drehrate der Erde ω_{Erde} und der Geschwindigkeit des Sensors \mathbf{v}_{HZ} im Horizontierten Koordinatensystem:

$$\begin{aligned} A_{sens,coriolis} &= 2 \begin{pmatrix} \omega_{x,Erde} \\ \omega_{y,Erde} \\ \omega_{z,Erde} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_{x,sens} \\ v_{y,sens} \\ v_{z,sens} \end{pmatrix} \\ &= 2 \begin{pmatrix} \omega_{y,Erde}v_{z,sens} - \omega_{z,Erde}v_{y,sens} \\ \omega_{z,Erde}v_{x,sens} - \omega_{x,Erde}v_{z,sens} \\ \omega_{x,Erde}v_{y,sens} - \omega_{y,Erde}v_{x,sens} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (A.1)$$

Diese Beschleunigung ist schwer zu bestimmen, da die durch die Erdrotation verursachte Drehrate abhängig von der aktuellen Fahrzeugposition auf der Weltkugel ist. Jedoch ist der Betrag sehr klein, da die Drehrate der Erde relativ gering ist.

A.2.2. Zentripetalbeschleunigung

Diese Beschleunigung wirkt, wenn der Sensor sich innerhalb des Inertialsystems auf einer gekrümmten Bahn bewegt und kann deshalb beispielsweise besonders bei Kreisfahrten gut beobachtet werden. Die Zentripetalbeschleunigung entspricht dem Kreuzprodukt zwischen der vom Sensor gemessenen Drehrate ω und der ins Fahrzeugfeste KS transformierten Fahrzeuggeschwindigkeit \mathbf{v}_{FF} , da der Sensor fest mit der Fahrzeugkarosserie verbunden ist.

$$\begin{aligned}
 A_{sens,zentripetal} &= \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \times R_{HZ \rightarrow FF} \cdot \begin{pmatrix} v_{x,HZ} \\ v_{y,HZ} \\ v_{z,HZ} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \omega_y v_{z,FF} - \omega_z v_{y,FF} \\ \omega_z v_{x,FF} - \omega_x v_{z,FF} \\ \omega_x v_{y,FF} - \omega_y v_{x,FF} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

A.2.3. Eulerbeschleunigung

Der Sensor erfährt eine Eulerbeschleunigung, wenn das Bezugssystem seine Rotationsgeschwindigkeit ändert. Diese Beschleunigung wirkt dann immer entgegengesetzt der hierdurch induzierten Geschwindigkeitsänderung im Inertialsystem. Damit lässt sich die Eulerbeschleunigung über das Kreuzprodukt zwischen der gemessenen Drehratenänderung $\dot{\omega}$ und der Entfernung \mathbf{r} zum Zentrum der Rotation bestimmen zu

$$A_{sens,euler} = \begin{pmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\omega}_y r_z - \dot{\omega}_z r_y \\ \dot{\omega}_z r_x - \dot{\omega}_x r_z \\ \dot{\omega}_x r_y - \dot{\omega}_y r_x \end{pmatrix} \tag{A.3}$$

A.2.4. Dislokationsbeschleunigungen

Durch die Positionierung des Sensors im Bezugssystem abseits des Ursprungs entstehen weitere nichtlineare Komponenten, die sich zusammenfassen lassen zu

$$A_{sens,dislok} = \begin{bmatrix} \omega_x (\omega_y r_y + \omega_z r_z) \\ \omega_y (\omega_z r_z + \omega_x r_x) \\ \omega_z (\omega_x r_x + \omega_y r_y) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_x (\omega_y^2 + \omega_z^2) \\ r_y (\omega_x^2 + \omega_z^2) \\ r_z (\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \tag{A.4}$$

Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit von der Drehrate spielen diese Beschleunigungen jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

A.2.5. Gravitation

Die betragsmäßig größte Fremdkomponente stellt die Erdgravitation dar. Sie lässt sich mit der Rotationsmatrix $R_{W \rightarrow FF}$ zwischen dem Welt- und Fahrzeugfesten KS berechnen zu

$$A_{sens,g} = R_{W \rightarrow FF} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}, \quad (A.5)$$

mit g als Gravitationskonstante.

A.2.6. Kombiniertes Messmodell

Setzt man alle betrachteten Beschleunigungen zusammen, so erhält man folgende Beschreibung der von dem Sensor gemessenen Beschleunigungen:

$$\begin{aligned} A_{FF} = & \begin{bmatrix} a_{linear,x} \\ a_{linear,y} \\ a_{linear,z} \end{bmatrix} + R_{W \rightarrow FF} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_{x,FF} \\ r_{y,FF} \\ r_{z,FF} \end{bmatrix} + 2 \begin{pmatrix} \omega_{x,Erde} \\ \omega_{y,Erde} \\ \omega_{z,Erde} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_{x,sens} \\ v_{y,sens} \\ v_{z,sens} \end{pmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \omega_x (\omega_y r_{y,FF} + \omega_z r_{z,FF}) \\ \omega_y (\omega_z r_{z,FF} + \omega_x r_{x,FF}) \\ \omega_z (\omega_x r_{x,FF} + \omega_y r_{y,FF}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{x,FF} (\omega_y^2 + \omega_z^2) \\ r_{y,FF} (\omega_x^2 + \omega_z^2) \\ r_{z,FF} (\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (A.6)$$

mit

$$\begin{bmatrix} a_{linear,x} \\ a_{linear,y} \\ a_{linear,z} \end{bmatrix} \quad (A.7)$$

als gesuchte lineare Beschleunigung des Fahrzeugs. Vereinfacht man diese Beschreibung, so erhält man letztendlich diese resultierende Beschreibung:

$$\begin{aligned}
 A_{FF} = & R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,HZ} \\ \dot{v}_{y,HZ} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\omega}_x r_{y,FF} - \dot{\omega}_y r_{x,FF} \end{bmatrix} + R_{W \rightarrow FF} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \times \left(R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} v_{x,HZ} \\ v_{y,HZ} \\ v_{z,HZ} \end{bmatrix} \right)
 \end{aligned} \tag{A.8}$$

Damit lässt sich diese Gleichung vereinfacht ausdrücken als

$$A_{FF} = A_{linear,FF} + A_{euler,FF} + A_{zentripetal,FF} + A_{g,FF}. \tag{A.9}$$

Für die Bestimmung der Fahrzeuglage sind die linearen Beschleunigungen von Bedeutung. Diese lassen sich nun durch die Kompensation der entsprechenden Euler-, Zentripetal- und Gravitationskräfte von den Sensormesswerten bestimmen.

$$A_{linear,FF} = A_{FF} - A_{euler,FF} - A_{zentripetal,FF} - A_{g,FF} \tag{A.10}$$

A.3. Kombiniertes Fahrwerksmodell

Mit dem im vorherigen Abschnitt aufgestellten Modell wurde beschrieben, wie aus den aufgenommenen Beschleunigungen des Sensors die lineare Beschleunigung des Fahrzeugs herausgerechnet werden kann. Wird dieser Teil der Gleichung genauer betrachtet, so kann die Rotationsmatrix mit einer Kleinwinkelnäherung vereinfacht werden. Da die auftretenden Nick- und Wankwinkel eines Fahrzeugs in der Regel auf unter 5° begrenzt sind, lässt sie sich umschreiben zu:

$$\begin{aligned}
 A_{linear,FF} &= R_{HZ \rightarrow FF} \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,HZ} \\ \dot{v}_{y,HZ} \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\theta \\ 0 & 1 & \varphi \\ \theta & -\varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,FF} \\ \dot{v}_{y,FF} \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \dot{v}_{x,FF} \\ \dot{v}_{y,FF} \\ \theta \cdot \dot{v}_{x,FF} - \varphi \cdot \dot{v}_{y,FF} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{A.11}$$

Wird nur die letzte Komponente der Beschleunigung betrachtet und entsprechend umgeformt, folgt der Zusammenhang:

$$a_{zlinear,FF} = \theta \cdot a_{xlinear,FF} - \varphi \cdot a_{ylinear,FF} \tag{A.12}$$

Diese Gleichung verdeutlicht einen Zusammenhang, der für das Levelingverfahren von essenzieller Bedeutung ist. Sie beschreibt den direkten Zusammenhang zwischen den linearen Beschleunigungen des Fahrzeugs in der Sensorposition und dem Nickwinkel θ .

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass diese Verbindung auch zum Wankwinkel φ des Fahrzeugs besteht. Bei Kurvenfahrten, wenn eine Querbesehleunigung auf das Fahrzeug wirkt, kann bei einer Wanksituation ein entsprechend proportionaler Anteil in der Vertikalbeschleunigung registriert werden. Falls einer der beiden Winkel bekannt ist, kann folglich aus den auf den Sensor wirkenden Beschleunigungen der andere Winkel bestimmt werden.

Diese direkte Beziehung zwischen der Größe der Beschleunigung und dem Nickwinkel ist eine Folge der Fahrwerkseigenschaften des Fahrzeugs. Bei einer Beschleunigung bzw. Bremsung entstehen unterschiedliche vertikale Kräfte auf die Federungskomponenten, die ein Nicken oder Wanken des Fahrzeugs herbeiführen. Der Zusammenhang ist dabei nicht überall linear und immer gesättigt, da durch den begrenzten Federweg kein unbegrenztes Nicken und Wanken stattfinden kann.

Nach Wallentowitz, 2005 und Matschinsky, 2007 ist der Nickwinkel eines Fahrzeugs eine Funktion der Längsbeschleunigung in x-Richtung a_x und der Wankwinkel eine Funktion der Querbesehleunigung in y-Richtung a_y .

Diese Beschleunigungen sind jedoch nicht die in den Abschnitten zuvor beschriebenen bereinigten, linearen Beschleunigungen. Wie auf den Sensor wirken auch auf das Fahrwerk des Fahrzeugs noch weitere Beschleunigungskomponenten, die sich zusammen auf das Verhalten auswirken. Deshalb werden die gemessenen, kompletten Beschleunigungen des IMU-Sensors im Fahrzeug-KS für diesen Zusammenhang benötigt.

Werden nur die während der Fahrt relevanten Beschleunigungen betrachtet, lässt sich ein Modell für das Verhalten wie folgt aufstellen:

$$\begin{aligned}\hat{\theta} &= \theta_0 + \theta_1 \cdot a_{x_{FF}} + \theta_2 \cdot a_{x_{FF}}^2 \\ \hat{\varphi} &= \varphi_0 + \varphi_1 \cdot a_{y_{FF}}\end{aligned}\tag{A.13}$$

Mit diesen Beobachtungen und dem jeweiligen Fahrwerksmodell lässt sich nun der komplette Zusammenhang der gemessenen Beschleunigungen mit den Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs beschreiben. Wird diese Gleichung in die Beschreibung der linearen z-Beschleunigung eingesetzt, so kann die Nick- und Wankwinkel des Fahrzeugs in Abhängigkeit der gemessenen Beschleunigungswerte beschrieben werden:

$$\begin{aligned}a_{z_{linear,FF}} &= (\theta_0 + \theta_1 \cdot a_{x_{FF}} + \theta_2 \cdot a_{x_{FF}}^2) \cdot a_{x_{linear,FF}} \\ &\quad - (\varphi_0 + \varphi_1 \cdot a_{y_{FF}}) \cdot a_{y_{linear,FF}}\end{aligned}\tag{A.14}$$

A.4. Test-Metriken

Um die Leistung und das Ergebnis der vom Algorithmus aufgestellten Winkelabschätzung zu bewerten, werden subjektive Testkriterien benötigt. Diese Kriterien stellen Anforderungen an den Verlauf und die Größe bestimmter Metriken, die zwischen dem Messsignal und einem Referenzsignal aufgestellt und im Folgenden vorgestellt werden:

Metrik 1: Bestimmungsfehler

Der Bestimmungsfehler θ_{err} entspricht der Differenz zweier Messwerte und zeigt auf, wie stark der aktuell berechnete Wert von dem der Referenzquelle abweicht. Er ist der wichtigste Faktor für die Bewertung der Ergebnisse und Grundlage für die weiteren Metriken 2 bis 4.

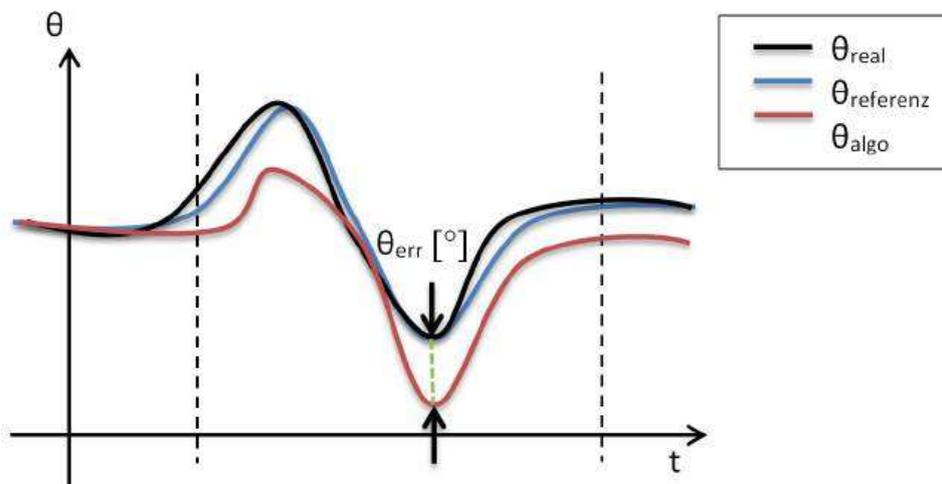


Abbildung A.1.: Beispielhafter Messverlauf der unterschiedlichen Quellen und der reale Winkel

Metrik 2: Situationsfehler

Der Situationsfehler erlaubt, das Verhalten des Algorithmus in bestimmten Fahrsituationen zu bewerten. Er wird gebildet, indem über den Bestimmungsfehler θ_{err} ein sliding window mit einer Breite von 10 Sekunden geschoben wird, bei dem zum mittleren Zeitpunkt des Fensters der Mittelwert des Fehlers innerhalb des Fensters zugeordnet wird.

Metrik 3: Situationsvarianz

Für die Situationsvarianz wird wie beim Situationsfehler ein sliding window über den Bestimmungsfehler gebildet, mit einer Breite von einer Sekunde.

Diesmal wird aber dem Mittelpunkt des Fensters die Standardabweichung der Fehler nach Gleichung A.4 innerhalb des Fensters zugeordnet.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N |\theta_{err,t} - \mu|^2} \text{ mit } \mu = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \theta_{err,t} \quad (\text{A.15})$$

Dies ermöglicht eine Beurteilung, wie stark der Algorithmus die Situation erlernt.

Metrik 4: Gesamtvarianz

Die Gesamtvarianz ist ein skalarer Wert und entspricht der Standardabweichung der Bestimmungsfehler einer kompletten Testfahrt. Durch sie lässt sich die Stabilität des Algorithmus für eine gesamte Fahrt beurteilen.

Anhang B.

Sensorfehler

Wie bei jedem Messsystem, sind auch die Messwerte des IMU-Sensors auf MEMS-Basis fehlerbehaftet. Die beispielhafte Fehlercharakteristik eines Sensors ist in Abbildung B.1 dargestellt, mit den typischen auftretenden Messfehlern.

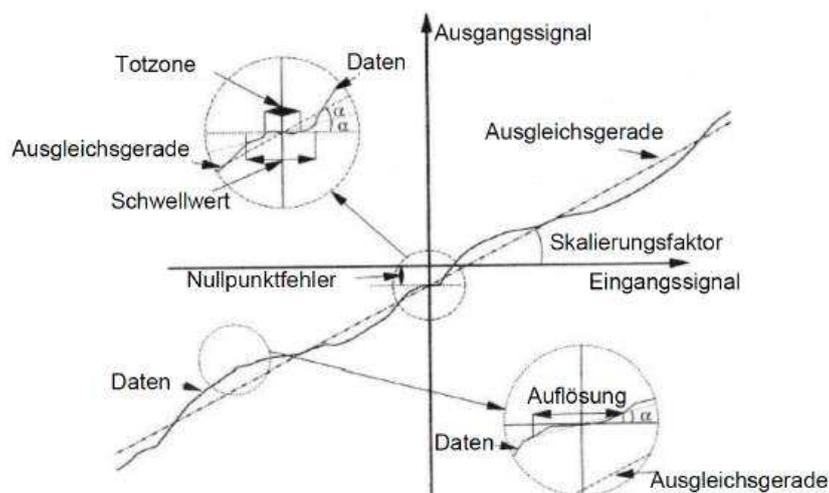


Abbildung B.1.: Typische Fehler einer Sensormessung

Für den Einsatz einer IMU in der LWR ist eine genaue Kenntnis über die Fehlereigenschaften der Sensoren erforderlich, da diese sich bei der Weiterverarbeitung teilweise direkt auf das Ergebnis und damit die erreichbare Genauigkeit des Levelling-Systems und die dynamischen Eigenschaften der

durch diese berechneten Winkel auswirken können. Nur durch ein genaues Verständnis über diese Fehler können sie umgangen oder reduziert und somit die Güte der Ergebnisse verbessert werden.

Dabei gibt es zahlreiche Fehlerfaktoren, die zum Gesamtfehler der Messung beitragen, die im einzelnen vorgestellt und näher betrachtet werden [NovA-tel, 2014] [Iv, Wall und Bevely, 2005].

Messbereich

Der Messbereich, also die Spanne der detektierbaren Messwerte eines IMU Sensors ist immer begrenzt. Es existiert eine maximal messbare Beschleunigung beziehungsweise Drehgeschwindigkeit, über welche hinaus die Messung unzuverlässig wird oder komplett beschränkt ist - die auf die Mikrostrukturen innerhalb des Sensors wirkenden Kräfte können keine weitere Auslenkung herbeiführen oder der Zusammenhang zwischen Kraft und Auslenkung beginnt sich zu ändern.

Der später im Fahrzeug einzusetzende Sensor muss folglich über einen Messbereich verfügen, welcher alle im Fahrbetrieb entstehenden Beschleunigungen und Drehgeschwindigkeiten abdeckt. Hierzu gehören aber nicht nur die für die spätere Berechnung des Fahrzeugnickenwinkels essenziellen Fahrzeugbeschleunigungen und durch Nick-, Gier- und Rollbewegungen herbeigeführten Drehraten. Auch Vibrationen im Fahrzeug verursachen Messwerte, die auf die echten Werte hinzukommen und den Messbereich sättigen, also die Messung verfälschen könnten.

Auflösung

Alle modernen IMU-Sensoren auf MEMS-Basis geben die Messwerte als ein digitales Signal aus, welches durch den internen, in der ASIC befindlichen Analog-Digital-Konverter (ADC) bereitgestellt wird. Der durch die Konvertierung entstehende Quantisierungsfehler q ist dabei abhängig von der Auflösung n des ADCs und dem Messbereich des Sensors, da alle möglichen Messwerte mit der vorhandenen Bit-Anzahl darstellbar sein müssen. Der Fehler entspricht am Ausgang somit maximal der Hälfte des

Wertes des niedrigwertigsten Bits (least-significant bit (LSB)), wenn der echte Messwert sich exakt zwischen zwei darstellbaren Werten befindet. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung B.1 dargestellt.

$$\max(q) = \frac{LSB}{2} = \frac{Messbereich}{2^{n+1}} \quad (B.1)$$

In Abbildung B.2 ist der Fehler in Rot eingezeichnet, der durch den quantisierten Ausgang zustande kommt. Zu erkennen ist auch der durch den begrenzten Messbereich entstehende Fehler, der bei zu großen Signalen linear mit seinem Wert ansteigt.

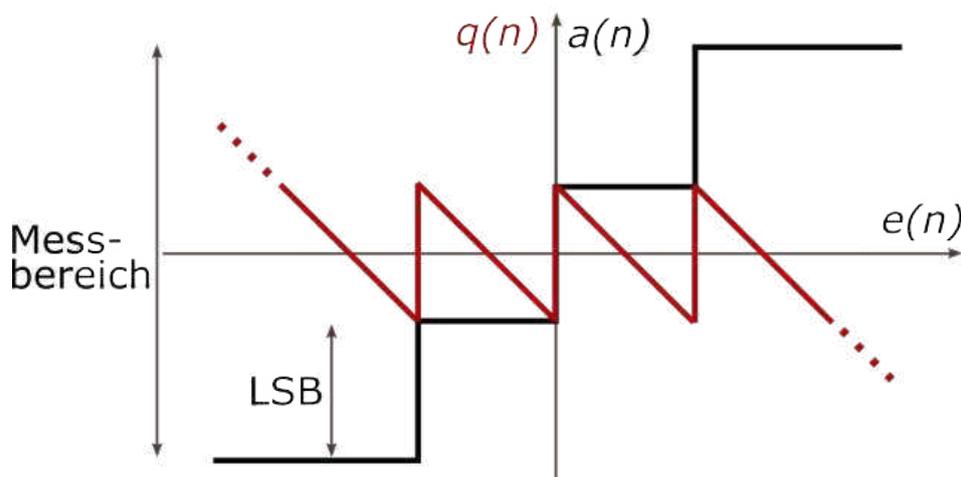


Abbildung B.2.: Quantisierungsfehler, der durch die beschränkte Auflösung einhergeht

Skalierungsfaktor

Wie in Abbildung B.1 gezeigt, besitzt auch ein IMU-Sensor einen sogenannten Skalierungsfaktor, der als die Steigung der Ein- und Ausgangsgerade aufgefasst werden kann. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen der Amplitude des Ausgangssignals zu der Amplitude des Eingangssignals. Besitzt der Sensor zum Beispiel einen Skalierungsfaktor von 1.02, so wird bei einem Accelerometer bei einer realen Beschleunigung von 10 m s^{-2} ein Wert von 10.2 m s^{-2} gemessen.

Der Skalierungsfaktor spielt somit eine gewichtige Rolle, insbesondere bei großen Beschleunigungen und Drehraten, bei welchen der Fehler entsprechend am größten ist. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die Nichtlinearität des Skalierungsfaktors, also wie sehr dieser abhängig vom Eingangswert variiert. Der lineare Anteil des Skalierungsfaktors kann, falls durch eine Kalibrierung bestimmt und bekannt, durch eine simple Multiplikation der Werte am Ausgang kompensiert werden. Die Kompensation des nichtlinearen Anteils hingegen erfordert eine exakte Kenntnis des Verlaufs oder ist nicht möglich, da seine Charakteristik oft zeit- und temperaturabhängig ist.

Sensor Non-Orthogonalität (Fehlausrichtung)

Der IMU-Sensor beinhaltet jeweils drei Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren, die orthogonal zueinander angebracht sind, um in allen drei Raumrichtungen messen zu können. Eine perfekt orthogonale Ausrichtung der einzelnen Sensoren zueinander kann jedoch nie vollständig erreicht werden, wodurch eine Interdependanz zwischen den Sensorachsen entsteht. So wird zum Beispiel bei einer statischen und vollständig horizontalen Ausrichtung des Beschleunigungssensors zur Erdbeschleunigung nicht nur in der z-Achse eine Beschleunigung detektiert, sondern auch die beiden anderen Achsen erfahren eine Beschleunigung. Das führt zu einer fehlerhaften Messung der in der Koordinatenachse wirkenden Beschleunigung, die sich gemeinsam mit dem Skalierungsfaktor S , wie in Gleichung B.2 dargestellt, in eine Messmatrix M überführen lässt. a markiert hierbei den Ausgabewert des Sensors und e die verursachende Beschleunigung/Drehrate.

$$a = M \cdot e = \begin{pmatrix} S_x(e_x) & \delta_{z_x} & -\delta_{y_x} \\ -\delta_{z_y} & S_y(e_y) & \delta_{x_y} \\ \delta_{y_z} & -\delta_{x_z} & S_z(e_z) \end{pmatrix} \cdot e \quad (\text{B.2})$$

Die Kompensation dieses Fehlers erfordert eine aufwändige Kalibrierung des Sensors mit Messungen der Effekte auf speziellen Messapparaturen und Drehtischen, was aufgrund des Aufwandes und der damit verbundenen Kosten für den Einsatz in einer LWR nicht durchführbar ist.

Im Gegensatz hierzu kann aber eine Fehlausrichtung der gesamten Sensoreinheit innerhalb des Packages mithilfe einer simplen Messwerte-Rotation nach einer Sensor-Kalibrierung ausgeglichen werden. Hierfür kann beispielsweise die Erdgravitation ausgenutzt werden, indem der Sensor in eine horizontale Position gebracht und die Lage der Erdgravitation bestimmt wird. Anschließend kann aus den Winkeln eine Rotationsmatrix aufgestellt werden, mit der alle zukünftigen Messwerte rotiert werden.

Bias / Nullpunktfehler

Jeder Messwert, der vom IMU-Sensor ausgegeben wird, besitzt eine konstante Abweichung vom realen detektierten Wert. Dieser Bias b ist auch dann existent, wenn keine äußere Beschleunigung bzw. Drehrate anliegt und wird dann als Nullpunktfehler, bzw. auf Englisch als zero-g/rate offset bezeichnet. Eingesetzt in obige Gleichung B.2 ergibt sich damit für den Ausgangswert des Sensors

$$a = M \cdot e + b. \quad (\text{B.3})$$

Der Nullpunktfehler weist außerdem zwei unterschiedliche Komponenten im zeitabhängigen Verhalten auf, was im Folgenden näher erläutert werden soll.

Bias Repeatability

Durch eine Änderung der Umgebungseigenschaften und verschiedener Startzustände der internen Signalverarbeitung der ASIC ist der Nullpunktfehler, den der IMU-Sensor aufweist, bei jedem Startvorgang unterschiedlich. Da diese Änderung beim späteren Einsatz im Fahrzeug im ausgeschalteten Zustand nicht nachverfolgt werden kann, ist bei einer hohen Varianz dessen deshalb erst eine initiale Abschätzungsphase nötig, bei welcher der Nullpunktfehler bestimmt wird.

Bias Stabilität

Während einer Messung ändert sich der Nullpunktfehler des Sensors mit der Zeit. Dies wird meist durch Änderungen der Umgebungs- und somit der Sensortemperatur oder der physikalischen Eigenschaften des Sensors, beispielsweise durch eine mechanische Belastung des gesamten Systems, verursacht.

Thermo-Mechanisches Weißes Rauschen

Dem Messsignal des Sensors ist immer ein weißes Rauschen überlagert, verursacht durch die thermische Bewegung der Elektronen. Wird ein konstantes Signal gemessen, existiert eine statistisch variierende Abweichung, mit einer frequenzabhängigen Leistungsdichte. In Abbildung B.3 ist eine verrauschte Beschleunigungsmessung eines MEMS-Sensors bei einer statischen Situation aufgezeigt.

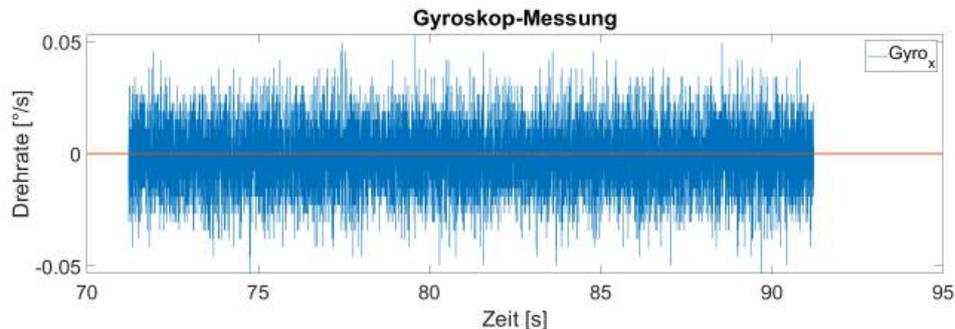


Abbildung B.3.: Verrauschtes Ausgangssignal eines MEMS-Gyroskops

Das Rauschen ist somit ein zusätzliches Signal, das beim Messmodell des Sensors, wie in Gleichung B.4 hinzuaddiert werden muss.

$$a = M \cdot e + b(t) + n(t) \quad (\text{B.4})$$

Die Integration dieses Rauschsignals führt zu einem Random Walk, also einem zufälligen Drift, beim Ergebnis, was insbesondere problematisch bei der Rekonstruktion einer Rotation aus den Drehraten des Gyroskops ist.

Temperatur-Effekte

Das Messsignal des Sensors weist eine hohe Temperaturabhängigkeit auf. Teilweise bereits in den Abschnitten Bias Stabilität und Bias Repeatability behandelt, sind viele Fehlereigenschaften des Sensors abhängig von seiner Temperatur. So gibt es einen starken Bias-Drift und eine Veränderung im Rauschverhalten. Fast alle IMU-Sensoren auf MEMS-Basis besitzen einen integrierten Temperatursensor, mit dessen Messwerten von Herstellerseite aus eine interne Stabilisierung der Messwerte erfolgt. Insbesondere die Änderung des Nullpunktfehlers kann so zu einem großen Teil ausgeglichen werden. Dies funktioniert jedoch nicht beim Rauschsignal, da es ein statistisches Signal ist. In Abbildung B.4 ist die Messung eines MEMS-Beschleunigungssensors unter sich ändernden Temperaturbedingungen zu sehen. Gut zu erkennen ist der sich ändernde Bias und das temperaturabhängige Rauschen.

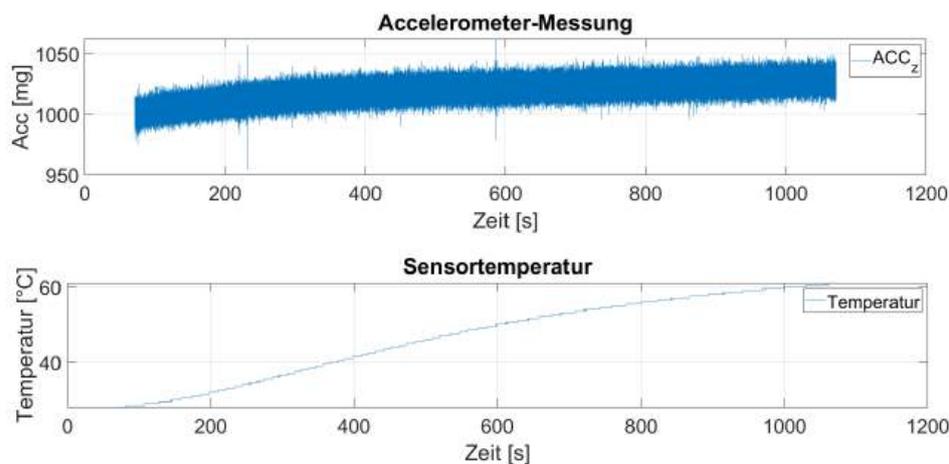


Abbildung B.4.: Temperaturabhängiger Ausgang eines MEMS-Accelerometers

Kalibrationsfehler

Einige der genannten Sensorfehler können durch eine entsprechende Kalibrierung beseitigt werden. Jedoch muss darauf geachtet werden, diese Kalibrierung korrekt und mit den passenden Geräten durchzuführen. Durch

eine fehlerhafte Kalibrierung können additive oder multiplikative Fehler in die Messung eingeführt werden.

Jitter und Timing Error

Durch Jitter der internen Clock des Sensors entstehen kleine Zeitabweichungen der Abtastzeitpunkte der internen Signalverarbeitung. Hierdurch wird das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) des ADCs beschränkt und falsche Werte für den jeweiligen Zeitpunkt ausgegeben. Weiterhin entstehen Probleme, falls die Uhr nicht synchron zur Zeit im später eingesetzten Fahrzeug ist, speziell in dynamischen Situationen, bei welchen der exakte Zeitpunkt von Bedeutung ist. Heutige Sensoren besitzen aber eine ausreichend hohe Datenrate und exakte Taktgeber, wodurch diese Fehler nur noch eine vernachlässigbare Rolle spielen.

Werden alle obigen Fehler zusammengefasst, so ergibt sich am Ende folgendes vereinfachtes Sensormessmodell:

$$a = M \cdot e + b(t) + n(t) + q \quad (\text{B.5})$$

Anhang C.

Simulation

Die erste Ausarbeitung und Evaluation der erarbeiteten Prädiktion erfolgte über simulierte Fahrzeugdaten, um langwierige Messaufbauten und eventuelle fehlerhafte Messungen (durch Bedienung, Defekt in der Hardware, usw.) zu umgehen.

Wichtig ist die Betrachtung der nötigen Geschwindigkeit des Systems, um eine zufriedenstellende Stabilisierung zu gewährleisten. Hierfür wird die Mercedes-Benz interne Fahrdynamiksimulation "FADYS" verwendet, welche es erlaubt, benutzerdefinierte Fahrten mit exakt nach dem realen Gegenpart konzipierten Fahrzeugen durchzuführen. Diese wird in eine visuelle Simulationsumgebung namens VTD integriert.

C.1. Simulationsumgebung

Für die Betrachtung des Verhaltens der Prädiktion liegt eine Simulationsumgebung vor, bei der die Fahrzeugbewegungen und die Ausgabe benötigter Sensorik in Echtzeit simuliert werden.

Das System baut hierbei auf einem existierenden Simulationssystem auf, das einen dreiteiligen Aufbau besitzt. Es besteht aus einem physischen Sitzkasten, mit dem das Fahrzeug dem realen Gegenstück entsprechend gesteuert werden kann, einer visuellen Fahrt- und Umgebungssimulation sowie einer komplexen Fahrdynamiksimulation.

Die Fahrzeugdynamik wird hierbei durch die Mercedes-Benz interne FADYS (Fahrtdynamiksimulation) Software simuliert, welche für den Einsatz in Fahrsimulatoren angepasst ist. Das Fahrzeug wird hier in seinen kompletten Fahreigenschaften, wie den für die Stabilisierung wichtigen Werten der Nick- und Wankbewegungen, abgebildet und ist in der Lage, weitreichende Informationen über den aktuellen Fahrzeugzustand, wie Raddrehzahlen oder Federwege, weiterzugeben. Weiterhin sind zusätzliche Sensoren, wie Drehraten- und Beschleunigungssensoren, frei am Fahrzeugkörper platzierbar und bedatbar.

Die visuelle Simulation erfolgt über das Virtual Test Drive (VTD) der Firma Vires, welches eine photorealistische und dynamische Darstellung der Fahrt und insbesondere des Lichtbilds der Scheinwerfer erlaubt und über die Fahrtdynamikchnittstelle mit FADYS gekoppelt ist. So können selbst komplexe und hochgenaue Fahrbahndaten im OpenCRG-Format auf VTD geladen und die Fahrt auf der Fahrbahn durch FADYS simuliert werden. Dadurch ist es möglich, Fahrzeug- und Scheinwerferbewegungen bei verschiedensten Fahrsituationen zu simulieren und auszuwerten.

Dazu werden Fahrzeugdaten von FADYS und virtuelle Kamerainformation von VTD auf einen dedizierten Algorithmus-PC durchgegeben. Durch eine weitere Verknüpfung mit einem realen Scheinwerfersteuergerät im Gesamtsystem wird zusätzlich das echte Signal der Steuergeräte übertragen und im Algorithmus-PC entsprechend verarbeitet.

In Abbildung C.1 ist die Struktur des Aufbaus schematisch aufgezeigt.

C.2. FADYS

FADYS ist echtzeitfähig und ermöglicht dadurch einen Einsatz des Systems in Fahrsimulatoren, bei denen ein großer Wert auf Genauigkeit und Erlebbarkeit gelegt wird.

FADYS besitzt dabei keine eigene graphische Benutzeroberfläche; Fahrzeuge und die durchzuführenden Fahrten, FADYS-intern als Manöver bezeichnet, werden in entsprechenden Textfiles definiert. In frei definierbaren Taktungen

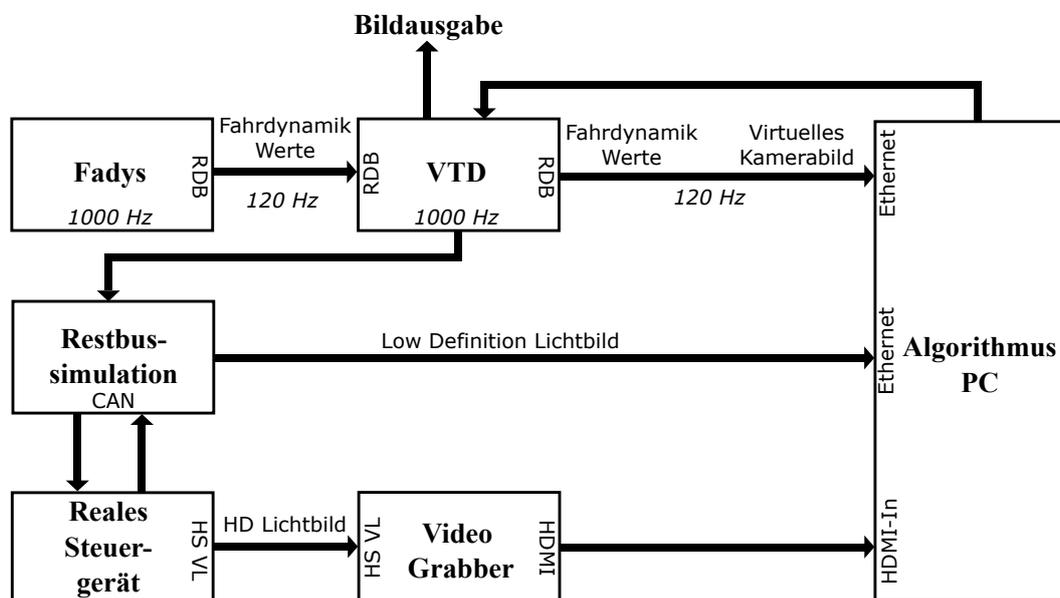


Abbildung C.1.: Schematischer Signalaufbau des Simulatoreaufbaus

werden anschließend Informationen zum Fahrzeug wie Nick- und Wankwinkel, Schwimmwinkel und Geschwindigkeit ausgegeben. Zusätzlich können selbst virtuelle Sensoren wie inertielle Beschleunigungs- und Drehratensensoren frei im Fahrzeug bedatet werden, um in allen gewünschten Positionen Auswertungen vornehmen zu können.

C.2.1. Fahrzeugbeschreibung

Fadys besitzt eine komplexe Beschreibung des simulierten Fahrzeugs, bei der Fahrzeugeigenschaften wie Abmaße, Gewichtsverteilung, Lenkung, Bereifung und Feder-/Dämpfereigenschaften festgelegt und sogar das Motorverhalten hinterlegt werden kann.

C.2.2. Manöverbeschreibung

Die Manöverbeschreibung in Fadys besteht aus zwei Komponenten, der Fahrbahn und der Fahrzeugbewegung, welche hier aufgezeigt werden.

Fahrzeugbewegung Die Fahrt des Fahrzeugs wird in zwei einfachen Bausteinen angegeben: Der aktuellen Geschwindigkeit und dem aktuellen Lenkwinkel. Man definiert zu gewählten Zeitpunkten ab Start der Simulation (2 Sekunden nach Start, 5 Sekunden nach Start,...) die aufzuweisende Geschwindigkeit und den Lenkwinkel des Fahrzeug. Dazwischen wird der Wert entsprechend linear interpoliert. Man darf jedoch nicht vergessen, dass auch hierbei das Fahrzeug mitsamt seines gesamten Antriebsstranges verwendet wird - kann das definierte Fahrzeug die nötige Beschleunigung nicht aufbringen (falls man beispielsweise von 0 auf 100 kmh in unter einer Sekunde beschleunigen möchte), wird das Fahrzeug dies auch nicht tun und bei einer niedrigeren Endgeschwindigkeit landen, als vorgegeben.

In der genutzten Simulationsumgebung werden der aktuelle Lenkwinkel und die Geschwindigkeit in Echtzeit an Fadys übergeben und verarbeitet.

Fahrbahn Die Fahrbahn ist im unveränderten Grundzustand eine unendlich große Ebene, die waagrecht steht. Kombiniert mit der definierten Fahrzeugbewegung lassen sich somit auch komplexe Fahrsituationen beschreiben.

Hat man noch größere Anforderungen an die Fahrbahnbeschreibung, oder möchte eine reale Strecke abfahren, ist FADYS zusätzlich in der Lage, mit den Dateiformaten OpenDRIVE und OpenCRG zu arbeiten, welche den Industriestandard in der Fahrbahnbeschreibung bilden.

OpenDRIVE liefert dabei den Topographieverlauf und Krümmungsänderungen der Straße und OpenCRG die dazugehörige genaue Oberflächenstruktur der Fahrbahn mit Genauigkeiten im Sub-Millimeter-Bereich. Fadys ist über die hinterlegten Fahrwerkseigenschaften in der Lage, den Einfluss der kompletten Fahrbahnstruktur auf die Fahrdynamik zu berücksichtigen und auszugeben.

C.3. Simulationsausgabe



Abbildung C.2.: Screenshot der visuellen Simulation über VTD

Anhang D.

DMD-Scheinwerfer

Fahrzeugscheinwerfer, welche aktuell die höchste Auflösung erreichen, basieren auf der Digital-Micromirror-Device (DMD) Technologie, die auch in Endverbraucher-Produkten wie Beamern Einsatz findet und vom US-Unternehmen Texas Instruments (TI) entwickelt wurde.

Hierbei wird das Licht für die Lichtverteilung im Scheinwerfer durch eine bis drei separate und leuchtstarke Einzel-LEDs erzeugt und dieses anschließend auf ein Spiegelarray, den DMD-Chip, gelenkt. Bei diesem Array als mikroelektromechanisches System (MEMS) kann die Ausrichtung der einzelnen Elemente unabhängig voneinander gesteuert werden. Sie können um ihre zentrale Planarachse um 12° (im Vergleich zum ebenen Grundzustand) in beide Richtungen gekippt werden, um das einfallende Licht entweder auf die Linse, und damit auf die Fahrbahn zu werfen oder auf eine Lichtfalle umzuleiten, sodass der Pixel im Lichtbild als ausgeschaltet angesehen wird.

Der im Einsatz befindliche DMD-Chip besitzt eine sogenannte Diamant-Anordnung der Mikrospiegel, was bedeutet, dass diese in einem Kreuzgitter angeordnet sind, wie in Abbildung D.1 zu sehen. Dies steht im Gegensatz zur Manhattan-Struktur, bei der die Spiegel in einem standardmäßigen horizontalen Gitter angeordnet sind.

Der in Fahrzeugscheinwerfern im Einsatz befindliche DMD-Chip besitzt eine Auflösung von 1152×1152 Spiegeln, wodurch sich über 1,3 Millionen Spiegel ergeben, die insgesamt über der Chipfläche verteilt sind.

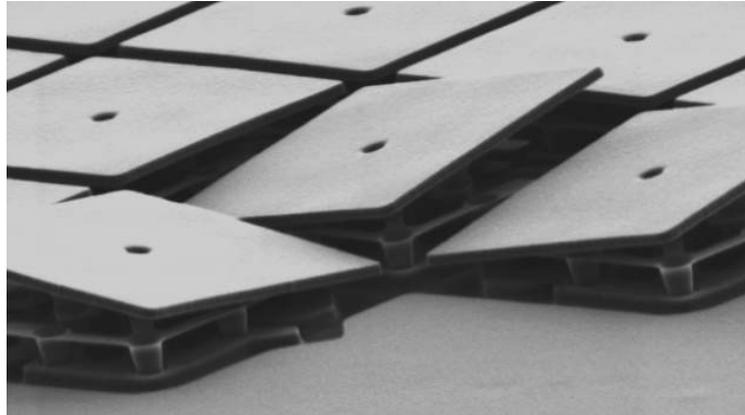


Abbildung D.1.: Nahaufnahme eines Mikrospiegel-Arrays unter dem Elektronenmikroskop [DMD 2020]

Die tatsächliche Auflösung des ausgestrahlten Lichtbilds ist aufgrund der Kreuzgitterstruktur jedoch nur halb so hoch. Für die Darstellung des Lichtbildes, dessen Pixel gegenüber der Spiegelstruktur um 45° verdreht sind, müssen 2 Spiegel zu einem Pixel zusammengefasst und gleichzeitig gesteuert werden. Dieser Zusammenhang ist in Grafik D.2 schematisch dargestellt.

Die Endauflösung des Bildes, das projiziert wird, liegt somit bei 1152×576 Pixeln. Diese Projektionstechnik zur Bilderzeugung wird von TI unter dem Namen Digital Light Processing (DLP) entwickelt und vermarktet.

Die fahrzeuginterne Bildberechnung erfolgt, um Rechenleistung und -zeit einzusparen, bei nur einem Viertel dieser Pixelanzahl - das berechnete Bild weist entsprechend eine Auflösung von 576×288 Pixel auf. Dieses Bild wird in das von TI gelieferte DLP-Chipset eingespeist, welches eine passende Extrapolation auf die DMD-Auflösung vornimmt, indem jedes Bildpixel durch vier Bild- bzw. acht Spiegelpixel dargestellt wird.

Abhängig von der Kippwinkelabfolge der Spiegel, ähnlich einer Steuerung per Pulsweitenmodulation (PWM), wird die Helligkeit des Ausgangspixels reguliert. Das Modul kann 8-Bit darstellen, somit 256 verschiedene Helligkeitsstufen für jeden Bildpixel ausgeben.

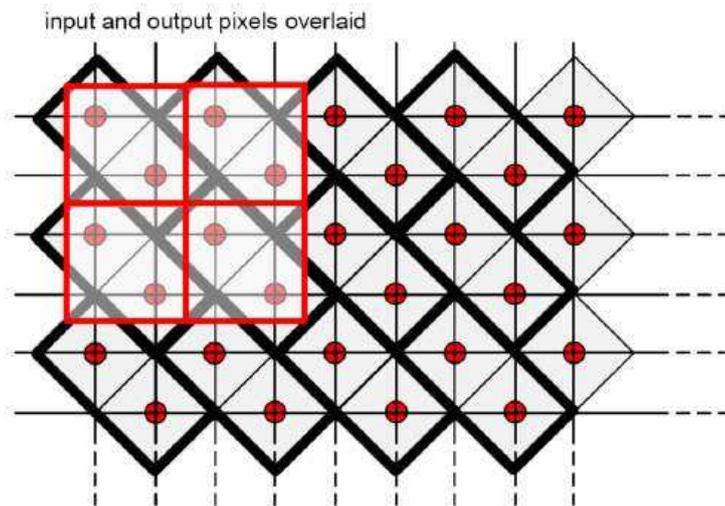


Abbildung D.2.: Zusammenfassung einzelner Mikrospiegel zu einer gitterförmigen Pixelstruktur [©Texas Instruments]

Die Fahrzeugscheinwerfer auf DMD-Basis haben einen modellabhängigen Abstrahlbereich von 6 bzw. 7° vertikal und 12 bzw. 14° horizontal. Die Projektionslinse ist hierbei so gestaltet, dass jeder Pixel denselben Winkelbereich abdeckt und diese somit homogen verteilt sind.

Durch die Bildberechnung auf Basis einer Auflösung von 576 x 288 Pixeln ergibt sich folglich eine Winkelauflösung von $\frac{7^\circ}{288 \text{ Pixel}} = 24,31 \frac{\text{m}^\circ}{\text{Pixel}}$ in der Vertikalen und ebenfalls $\frac{14^\circ}{576 \text{ Pixel}} = 24,31 \frac{\text{m}^\circ}{\text{Pixel}}$ auf der Horizontalen.

Dies bedeutet, dass eine digitale Korrektur des Scheinwerferabstrahlwinkels durch Verschiebung des Bildsignals nur in Schritten mit dieser Weite erfolgen kann. Dadurch ist die Positionierung auf eine halbe Pixelweite genau möglich, was eine Winkelgenauigkeit der Projektion von 12,15 m° ergibt.

Zusätzlich ist die vertikale Position des Lichtmoduls wie immer über einen Schrittmotor im Nickwinkel regulierbar.

Anhang E.

Zusatzmaterial

E.1. Statisches Abtastverhalten

In den nachfolgenden Abbildungen sind mit verschiedenen Abtastverfahren gefilterte Darstellungen von verschiedenen Symbolprojektion dargestellt.

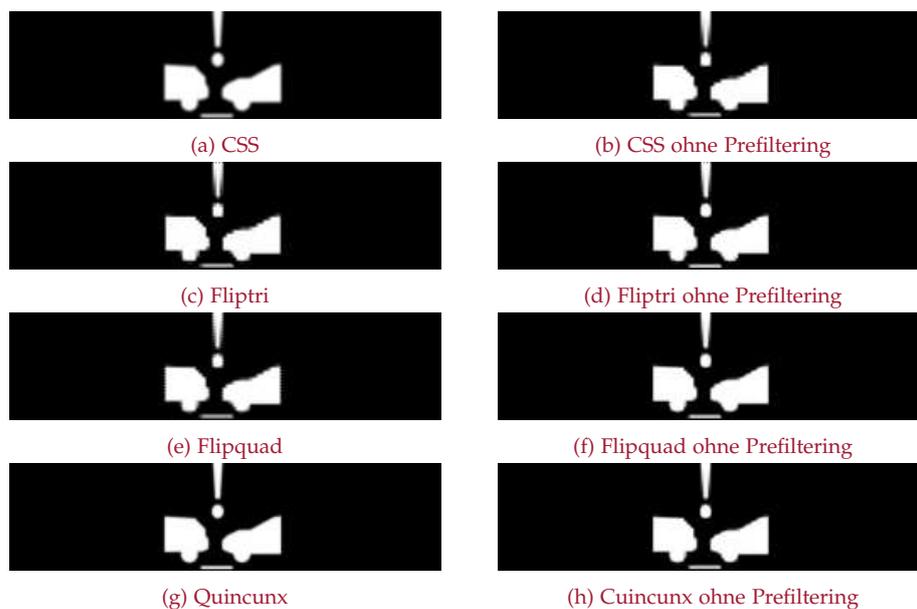


Abbildung E.1.: Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Kollisionswarnung 2

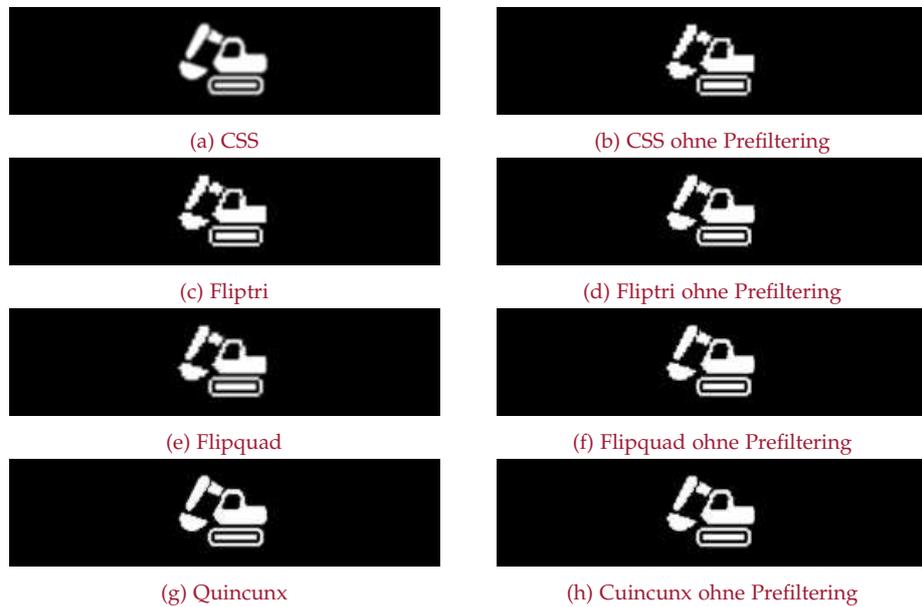


Abbildung E.2.: Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Baustellenwarnung

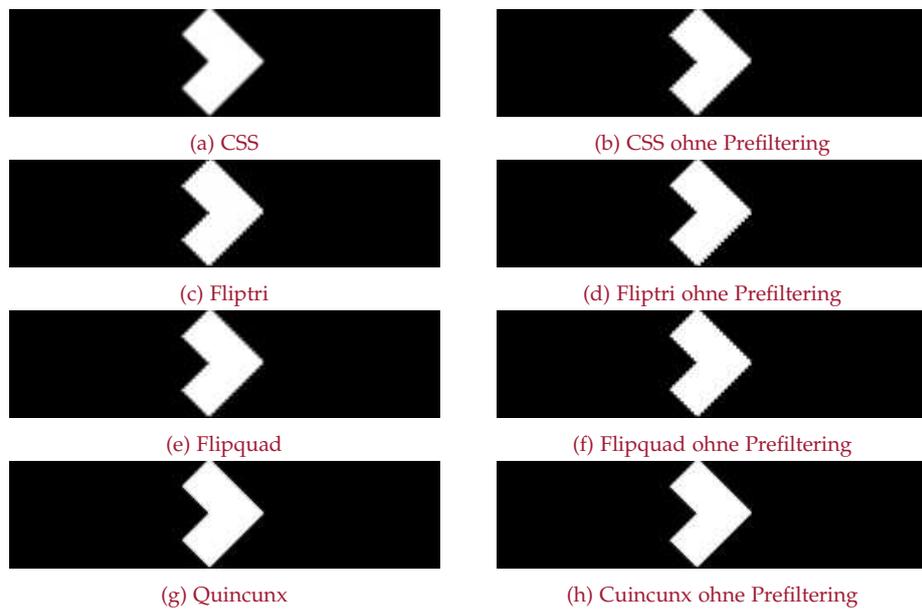


Abbildung E.3.: Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Departure Warning

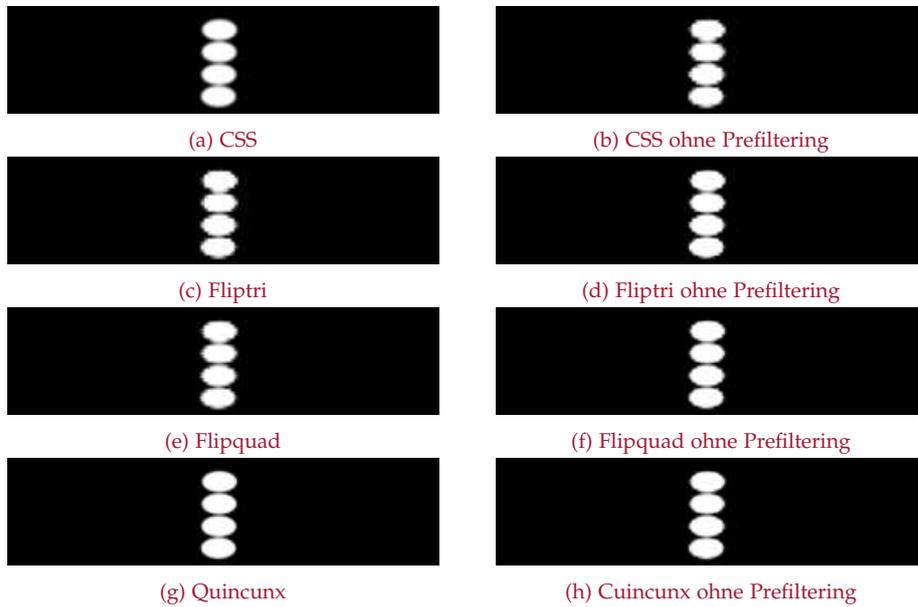


Abbildung E.4.: Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf den Spotlight

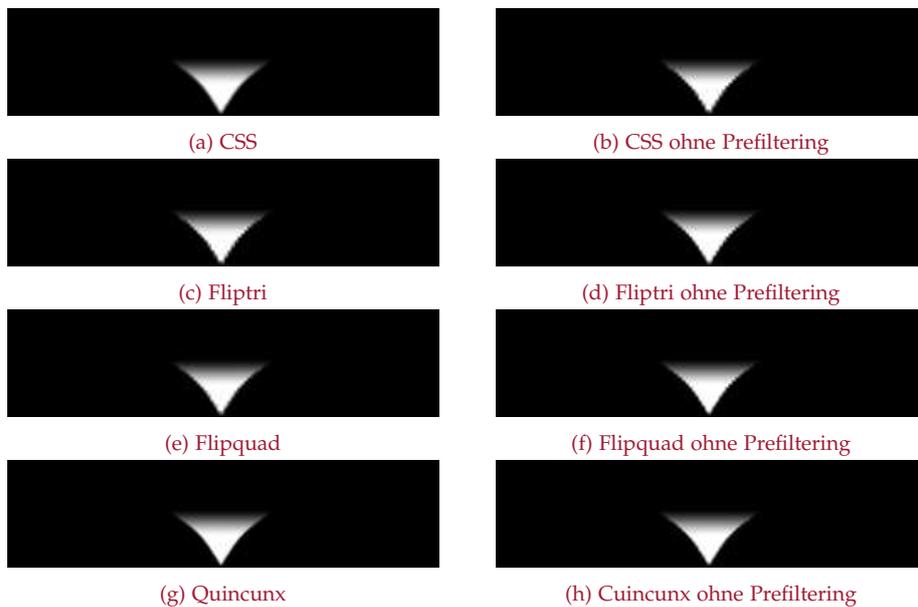


Abbildung E.5.: Übersicht der verschiedenen Filterungen angewendet auf die Kollisionswarnung 2

E.2. Dynamisches Abtastverhalten

In Abbildungen E.6 und E.7 sind bewegungskompensierte Auf- und Abbewegungen einer Symbolprojektion dargestellt. Im Vergleich zu E.6, wo die Symboldarstellung während der Bewegung kohärent bleibt, werden in E.7 durch die Eigenschaften von FlipTri und dem fehlenden Prefiltering ein Kantenflimmern und Zeilensprünge verursacht.

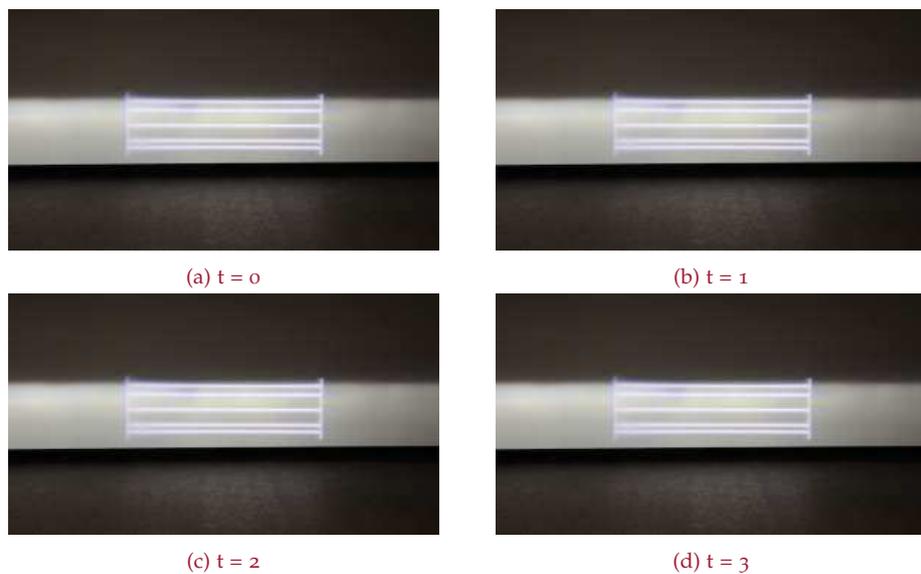


Abbildung E.6.: Stabilisierte Symbolprojektion durch Quincunx mit Prefiltering

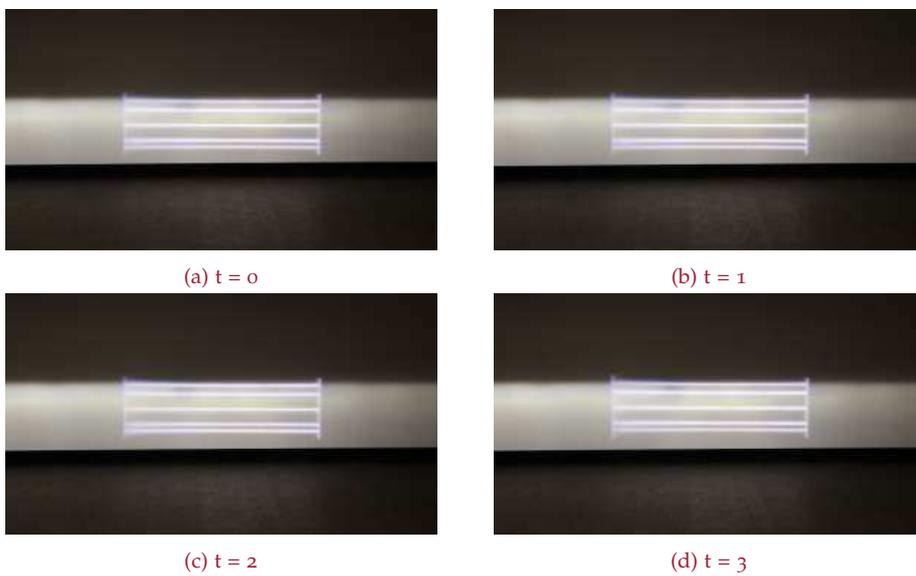


Abbildung E.7.: Stabilisierte Symbolprojektion durch FlipTri ohne Prefiltering

Literatur

- Ahmed, Hamad und Muhammad Tahir (2017). »Accurate Attitude Estimation of a Moving Land Vehicle Using Low-Cost MEMS IMU Sensors«. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 18.7, S. 1723–1739. DOI: [10.1109/TITS.2016.2627536](https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2627536) (siehe S. 197).
- Akenine-Möller, Tomas (2003). »An Extremely Inexpensive Multisampling Scheme«. In: (Siehe S. 210).
- Akenine-Möller, Tomas und Jacob Ström (2003). »Graphics for the masses: a hardware rasterization architecture for mobile phones«. In: *ACM SIGGRAPH 2003 Papers* (siehe S. 210).
- Ansara, Andrew u. a. (Sep. 2017). »Optimization of Front Suspension and Steering Parameters of an Off-road Car using Adams/Car Simulation«. In: *International Journal of Engineering Research and Technology* 6, S. 104 (siehe S. 94).
- Bochkovskiy, Alexey, Chien-Yao Wang und Hong-Yuan Mark Liao (2020). *YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection*. arXiv: [2004.10934](https://arxiv.org/abs/2004.10934) [cs.CV] (siehe S. 136).
- Bouguet, J.-Y. und P. Perona (1998). »3D photography on your desk«. In: *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271)*, S. 43–50. DOI: [10.1109/ICCV.1998.710699](https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710699) (siehe S. 115).
- Bouville, Christian, Pierre Tellier und Kadi Bouatouch (1991). »Low Sampling Densities using a psychovisual approach«. In: *Eurographics* (siehe S. 212, 215).
- Brink, Willie, Alan Robinson und Marcos A. Rodrigues (2008). »Indexing Uncoded Stripe Patterns in Structured Light Systems by Maximum Spanning Trees«. In: *British Machine Vision Conference* (siehe S. 144).
- Brown, Dean (1966). »Decentering distortion of lenses«. In: (Siehe S. 63).
- CloudCompare (2023). Version 2.12.4. URL: <http://www.cloudcompare.org/> (siehe S. 146).

- Cook, Robert L. (Jan. 1986). »Stochastic Sampling in Computer Graphics«. In: *ACM Trans. Graph.* 5.1, S. 51–72. ISSN: 0730-0301. DOI: [10.1145/7529.8927](https://doi.org/10.1145/7529.8927). URL: <https://doi.org/10.1145/7529.8927> (siehe S. 210).
- Cramer, Simon (24. Sep. 2019). *Predictive Pose Estimation for AR-HUD*. Techn. Ber. Daimler AG (siehe S. 162–164, 167).
- Cytrynski, Stefan (Juli 2013). *Dokumentation Road Surface Scan W/V 222*. Techn. Ber. Daimler AG - Group Research und Mercedes Car Group Development (siehe S. 48).
- Daglioglu, Mehmet Ali (2021). »Object-Detection mit You Only Look Once (YOLO): Einführung in die Objekterkennung mit YOLO sowie die Weiterentwicklung in den Versionen v2-v4«. Diss. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hof (siehe S. 136).
- Davis, James, Yi-Hsuan Hsieh und Hung-Chi Lee (Feb. 2015). »Humans perceive flicker artifacts at 500 Hz«. In: *Scientific Reports* 5.1, S. 7861. ISSN: 2045-2322. DOI: [10.1038/srep07861](https://doi.org/10.1038/srep07861). URL: <https://doi.org/10.1038/srep07861> (siehe S. 105).
- Deglint, Jason u. a. (Juni 2016). »Numerical Demultiplexing of Color Image Sensor Measurements via Non-linear Random Forest Modeling«. In: *Scientific Reports* 6.1, S. 28665. ISSN: 2045-2322. DOI: [10.1038/srep28665](https://doi.org/10.1038/srep28665). URL: <https://doi.org/10.1038/srep28665> (siehe S. 53).
- Deng, Jia u. a. (2009). »ImageNet: A large-scale hierarchical image database«. In: *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 248–255. DOI: [10.1109/CVPR.2009.5206848](https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206848) (siehe S. 136).
- Dipl.-Ing. G. Hartkopf, Dr.-Ing. habil. G. Weise (2. Okt. 2012). *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen*, RAL. Techn. Ber. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf (siehe S. 38, 193).
- Eiriksson, E. R. u. a. (2016). »PRECISION AND ACCURACY PARAMETERS IN STRUCTURED LIGHT 3-D SCANNING«. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W8*, S. 7–15. DOI: [10.5194/isprs-archives-XL-5-W8-7-2016](https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-5-W8/7/2016/). URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XL-5-W8/7/2016/> (siehe S. 115).
- Fiege, Marcus u. a. (7. Juli 2015). »Method and device for detecting a vehicle environment«. DE102015008774B4 (siehe S. 121, 122).

- Geiger, Andreas (2021). *Computer Vision Lecture Notes*. URL: https://drive.google.com/file/d/1J4jA3wAteiChtSAdGgd_2PaWklabBsek/view (besucht am 25.04.2023) (siehe S. 65).
- Geiger, Andreas u. a. (2012). »Automatic camera and range sensor calibration using a single shot«. In: *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 3936–3943. DOI: [10.1109/ICRA.2012.6224570](https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224570) (siehe S. 127).
- Gilmore, Harry F., Richard C. Ramsey und Thomas R. Fahy (28. Dez. 1962). *Feasibility Study of Terrain Sensors and Terrain Sensing*. Techn. Ber. Emerson Electric Co. (siehe S. 115).
- Gioi, Rafael Grompone von u. a. (2010). »LSD: A Fast Line Segment Detector with a False Detection Control«. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32, S. 722–732 (siehe S. 47, 137).
- Hartley, R. I. und A. Zisserman (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518 (siehe S. 56, 57, 60).
- Hasselgren, Jon, Tomas Akenine-Möller und Samuli Laine (2005). »A Family of Inexpensive Sampling Schemes«. In: *Computer Graphics Forum* 24.4, S. 843–848 (siehe S. 211, 212).
- He, Leiying, Shanshan Wu und Chuanyu wu (Feb. 2017). »Robust laser stripe extraction for three-dimensional reconstruction based on a cross-structured light sensor«. In: *Applied Optics* 56, S. 823. DOI: [10.1364/AO.56.000823](https://doi.org/10.1364/AO.56.000823) (siehe S. 129).
- Heißing, B., M. Ersoy und S. Gies (2011). *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg+Teubner Verlag. ISBN: 9783834881687. URL: <https://books.google.de/books?id=qEIkBAAAQBAJ> (siehe S. 188).
- Hover, Franz S. und Michael S. Triantafyllou (2010). *System Design for Uncertainty* (siehe S. 272).
- Standardization, International Organization for (Dez. 2011). *Road vehicles - Vehicle dynamics and road-holding ability - Vocabulary*. Standard. Geneva, CH. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:8855:ed-2:v1:en> (siehe S. 34).
- Iv, Warren S. Flenniken, John H. Wall und David M. Bevly (2005). »Characterization of Various IMU Error Sources and the Effect on Navigation Performance«. In: URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16816374> (siehe S. 282).

- Jones, Brett u. a. (2014). »RoomAlive: Magical Experiences Enabled by Scalable, Adaptive Projector-Camera Units«. In: *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '14. Honolulu, Hawaii, USA: Association for Computing Machinery, S. 637–644. ISBN: 9781450330695. DOI: [10.1145/2642918.2647383](https://doi.org/10.1145/2642918.2647383). URL: <https://doi.org/10.1145/2642918.2647383> (siehe S. 68).
- Koletzko, Christian (21. Nov. 2007). »Untersuchung des Einflusses von Verstelldämpfern auf das Wankverhalten von PKW unter Berücksichtigung einer aktiven Wankstabilisierung«. Diss. Technische Universität München (siehe S. 190).
- Kuczora, Veit (9. Nov. 2015). *Straßenentwurf mit CARD/1. Grundlagen*. 3. Aufl. Springer Vieweg Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-10051-3. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-10051-3> (siehe S. 192).
- Laine, S. und T. Aila (2006). »A Weighted Error Metric and Optimization Method for Antialiasing Patterns«. In: *Computer Graphics Forum*. ISSN: 1467-8659. DOI: [10.1111/j.1467-8659.2006.00919.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2006.00919.x) (siehe S. 213).
- Lambert, Jacob u. a. (2020). »Performance Analysis of 10 Models of 3D LiDARs for Automated Driving«. In: *IEEE Access* 8, S. 131699–131722. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3009680](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009680) (siehe S. 115).
- Lee, Jung Keun, Edward J. Park und Stephen N. Robinovitch (2012). »Estimation of Attitude and External Acceleration Using Inertial Sensor Measurement During Various Dynamic Conditions«. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 61.8, S. 2262–2273. DOI: [10.1109/TIM.2012.2187245](https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2187245) (siehe S. 197).
- Madlindl, Patrick (15. Sep. 2021). »Erstellung eines mathematischen Modells zur Beschreibung der Projektionscharakteristiken eines Fahrzeugscheinwerfers«. Duale Hochschule Baden-Württemberg.
- Mai, Long, Hoang Le und Feng Liu (2017). »Content and Surface Aware Projection«. In: *Graphics Interface* (siehe S. 68).
- Matschinsky, Wolfgang (2007). *Radführungen der Straßenfahrzeuge* (siehe S. 199, 200, 277).
- Moreno, Daniel und Gabriel Taubin (2012). »Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration«. In: *2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission*, S. 464–471. DOI: [10.1109/3DIMPVT.2012.77](https://doi.org/10.1109/3DIMPVT.2012.77) (siehe S. 68, 134, 230).
- Murata, Satoshi und Kaori Fujinami (2011). »A Stabilization Method of Projected Images for Wearable Projector Applications«. In: *Proceedings*

- of the 13th International Conference on Ubiquitous Computing. UbiComp '11. Beijing, China: Association for Computing Machinery, S. 469–470. ISBN: 9781450306300. DOI: [10.1145/2030112.2030175](https://doi.org/10.1145/2030112.2030175). URL: <https://doi.org/10.1145/2030112.2030175> (siehe S. 4).
- Naiman, Avi C. (Okt. 1998). »Jagged Edges: When is Filtering Needed?« In: *ACM Trans. Graph.* 17.4, S. 238–258. ISSN: 0730-0301. DOI: [10.1145/293145.293147](https://doi.org/10.1145/293145.293147). URL: <https://doi.org/10.1145/293145.293147> (siehe S. 213).
- NovAtel (21. Feb. 2014). *IMU Errors and Their Effects*. Techn. Ber. (siehe S. 282).
- NVIDIA (2001). *HRAA: High-resolution Antialiasing through Multisampling*. Techn. Ber. (siehe S. 210).
- Rajesh, R J und P Kavitha (2015). »Camera gimbal stabilization using conventional PID controller and evolutionary algorithms«. In: *2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4)*, S. 1–6. DOI: [10.1109/IC4.2015.7375580](https://doi.org/10.1109/IC4.2015.7375580) (siehe S. 73).
- Redmon, Joseph, Santosh Divvala u. a. (2016). *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*. arXiv: [1506.02640](https://arxiv.org/abs/1506.02640) [cs.CV] (siehe S. 136).
- Redmon, Joseph und Ali Farhadi (2018). *YOLOv3: An Incremental Improvement*. arXiv: [1804.02767](https://arxiv.org/abs/1804.02767) [cs.CV] (siehe S. 136).
- Satopaa, Ville u. a. (2011). »Finding a "Kneedle" in a Haystack: Detecting Knee Points in System Behavior«. In: *2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, S. 166–171. DOI: [10.1109/ICDCSW.2011.20](https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2011.20) (siehe S. 140).
- Schad, Dennis (27. Sep. 2021). »Simulative Bildstabilisierung von Scheinwerferprojektionen«. Duale Hochschule Baden-Württemberg.
- Schneider, Christian (5. Sep. 2019). »Entwicklung eines tiefenwahrnehmenden Scheinwerfer-Kamera-Systems«. Diss. Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technik (siehe S. 4, 116, 121).
- Schweiker, Annette (26. Feb. 2021). *Prädiktion von Fahrzeugaufbaubewegungen*. Techn. Ber. Mercedes-Benz AG.
- Tico, M. und M. Vehvilainen (2007). »Robust Image Fusion for Image Stabilization«. In: *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07*. Bd. 1, S. I-565–I-568 (siehe S. 75).

- Tico, Marius und Markku Vehvilainen (2008). »Robust method of digital image stabilization«. In: *2008 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing*, S. 316–321 (siehe S. 4).
- Time-of-Flight ranging sensor* (Dez. 2022). VL53LoX. Rev. 5. STMicroelectronics (siehe S. 115).
- Trujillo-Pino, Agustín u. a. (Jan. 2012). »Accurate Subpixel Edge Location based on Partial Area Effect«. In: *Image and Vision Computing* 31. DOI: [10.1016/j.imavis.2012.10.005](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2012.10.005) (siehe S. 137).
- UNECE (8. Nov. 2019). *Addendum 47 – UN Regulation No. 48 Revision 12 - Amendment 8 Installation of lighting and light-signalling devices*. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R048r12am8e.pdf> (siehe S. 83).
- Unterreiner, Michael (2014). »Modellbildung und Simulation von Fahrzeugmodellen unterschiedlicher Komplexität«. In: (Siehe S. 188, 189).
- Wallentowitz, Henning, Hrsg. (Jan. 2005). *Vertikal-/ Querdynamik von Kraftfahrzeugen* (siehe S. 186, 277).
- Wang, Wei und Javed Masood Rana (2020). »Model-free-adaptive-based data-driven method for three-axis Gimbal control«. In: *Measurement and Control* 53.7-8, S. 1512–1517. DOI: [10.1177/0020294020944970](https://doi.org/10.1177/0020294020944970). eprint: <https://doi.org/10.1177/0020294020944970>. URL: <https://doi.org/10.1177/0020294020944970> (siehe S. 73).
- Wehle, Max (27. Apr. 2022). »Tracing einer Lichtstruktur im dynamischen Fahrbetrieb zur 3D-Rekonstruktion«. Magisterarb. Universität Ulm (siehe S. 114, 126, 127, 129–131).
- Yargeldi, Sinan (27. Juni 2019). »Automatische Leuchtweitenregulierung basierend auf Inertialsensoren«. Magisterarb. Universität Ulm, Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik (siehe S. 40, 101, 185, 191, 193, 197, 199).
- Yargeldi, Sinan (18. März 2021). »Verfahren zur dynamischen und eindeutigen Tiefeninformationsgewinnung für ein One-Shot Strukturiertes-Licht-System«. DE 102020007613 A1.
- Yargeldi, Sinan (9. Sep. 2022). »Scheinwerferkalibrierung im Feld mit Projektionsflächenerkennung«. 102022003313.5.
- Yargeldi, Sinan (25. Sep. 2023). »Compensation of Vehicle Movement and Surface Roughness for Headlamp Road Projections«. In: *ISAL 2023*.
- Yargeldi, Sinan, Davide Baccarin und Andreas Schwarzenberger (21. Apr. 2022). »Method for improving accuracy of IMU AVAC«. DE102021006290.

- Yargeldi, Sinan, Axel Müller und Martin Borowski (28. Juli 2022). »System zur gesteuerten Erfassung des Fahrzeug-Frontfelds unter Verwendung einer strukturierten Beleuchtung durch Micro Lens Arrays«. DE 102021000724 B3.
- Yargeldi, Sinan und Anton Nelson (30. Mai 2022a). »System zur automatischen Kalibrationssteuerung von Inertialsensoren in Landfahrzeugen«. 102022001883.7.
- Yargeldi, Sinan und Anton Nelson (8. Juni 2022b). »System zur automatischen Leuchtweitenregulierung mittels Fusion multipler Signalquellen«. 102022001983.3.
- Yargeldi, Sinan, Anton Nelson und Davide Baccarin (1. Nov. 2022). »System zur automatischen Selbstkalibration eines Inertialsensors in Landfahrzeugen«. 102022128870.6.
- Yargeldi, Sinan und Max Wehle (15. Sep. 2022a). »System zur dreidimensionalen Rückfelderfassung im Fahrzeug«. DE102022002766.
- Yargeldi, Sinan und Max Wehle (22. Sep. 2022b). »System zur dreidimensionalen Seitenfelderfassung im Fahrzeug«. DE102022002767.
- Yargeldi, Sinan und Max Wehle (15. Juni 2022c). »System zur Straßenprofilerfassung und Objektdetektion unter Verwendung strukturierter Beleuchtung«. DE102022001440.
- Yellott, John (Aug. 1983). »Spectral Consequences of Photoreceptor Sampling in the Rhesus Retina«. In: *Science (New York, N.Y.)* 221, S. 382–5. DOI: [10.1126/science.6867716](https://doi.org/10.1126/science.6867716) (siehe S. 210).
- Zhang, Y. u. a. (2009). »Study on Electronic Image Stabilization System Based on MEMS Gyro«. In: *2009 International Conference on Electronic Computer Technology*, S. 641–643 (siehe S. 38).
- Zhang, Zhengyou (2000). »A Flexible New Technique for Camera Calibration.« In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 22.11, S. 1330–1334. URL: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/pami/pami22.html#Zhang00> (siehe S. 127, 132).

Onlinequellen

- ASAM (9. Apr. 2023a). *OpenCRG Version 1.2.0*. URL: <https://www.asam.net/standards/detail/opencrg/> (siehe S. 42).
- ASAM (9. Apr. 2023b). *OpenDRIVE: Concept Document*. URL: <https://www.asam.net/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=3907&token=fffa694711f0cd3cc37e61f38587b3a308e9a720> (siehe S. 42).
- DMD (17. Feb. 2020). URL: https://cdn.weka-fachmedien.de/thumbs/media_uploads/images/1517925494-303-wor27kx9h.jpg.950x534.jpg (siehe S. 296).
- Edmund-Optics (25. Apr. 2023). *Understanding Camera Sensors for Machine Vision Applications*. Edmund Optics. URL: <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/understanding-camera-sensors-for-machine-vision-applications/> (siehe S. 54).
- Preiss, Walter, Hrsg. (9. Dez. 2023). *Spektrale Empfindlichkeit Sensor*. URL: <http://www.fen-net.de/walter.preiss/e/slomoinf.html> (siehe S. 52).