

NICHT-WAHRNEHMbare PHOTOGRAMMETRIE FÜR SCHEINWERFERPROJEKTIONSMODULE

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

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

DISSERTATION

von
Ridon Arifi, M.Sc.
geboren am und in: 18.04.1995, Neuburg an der Donau

Tag der mündlichen Prüfung: 16.06.2025

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork

Meinen Eltern Habib und Hava Arifi

Der Weg zur Erkenntnis führt durch das Verborgene.

ABSTRACT

The aim of automotive lighting technology is to ensure maximum visibility with minimum glare for road users. Especially in night-time scenarios, lighting systems make an essential contribution to road safety. Consequently, precisely adjusted and calibrated headlamp systems form the basis for proper light distribution.

This thesis focuses on the investigation and implementation of misalignment detection for automotive headlights using high-resolution projection modules. The approach uses only the components which are already present in a vehicle. A legally compliant light distribution is therefore required so that the method can be used in the public traffic area. As part of the work, the investigation of temporally modulated projections is carried out, which considers the conflict of objectives between visually imperceptible projections and camera-based detectable features. The approach takes into account currently integrated hardware components, which results in limitations and requirements with regard to applicability.

The implemented approach achieves an accuracy of $\leq 0.1^\circ$ regarding the misalignment detection in horizontal and vertical direction. The suitability of temporal modulation for concealing the characteristic features can be confirmed on the basis of the subject study carried out. In addition, the investigations show that the methodology should primarily be used for highway scenarios.

KURZFASSUNG

Das Ziel der automobilen Lichttechnik besteht darin, maximale Sichtverhältnisse bei minimaler Blendung der Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten. Vor Allem bei nächtlichen Szenarien liefern Beleuchtungssysteme einen essentiellen Beitrag zur Sicherheit im Verkehr. Folglich bilden präzise eingestellte und kalibrierte Scheinwerfersysteme die Basis für eine ordnungsgemäße Lichtverteilung.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung und Umsetzung einer Fehlstellungsdetektion für automobile Scheinwerfer unter Verwendung hochauflösender Projektionsmodule. Dabei nutzt das Verfahren lediglich die in einem Fahrzeug verfügbaren Komponenten. Damit das Verfahren im öffentlichen Verkehr angewendet werden kann, ist demnach eine gesetzeskonforme Lichtverteilung erforderlich. Im Rahmen der Arbeit erfolgt die Untersuchung zeitlich modulierter Projektionen, welche den Zielkonflikt zwischen visuell nicht wahrnehmbaren Projektionen und kamerabasiert detektierbaren Merkmalen betrachtet. Der Ansatz berücksichtigt dabei aktuell verbaute Hardwarekomponenten, wodurch sich Einschränkungen und Anforderungen hinsichtlich der Anwendbarkeit ergeben.

Der umgesetzte Ansatz erreicht für die Fehlstellungsdetektion eine Genauigkeit von $\leq 0,1^\circ$ in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Eignung der zeitlichen Modulation zum Verbergen der charakteristischen Merkmale lässt sich anhand der durchgeföhrten Probandenstudie bestätigen. Zudem resultiert aus den Untersuchungen, dass die Methodik vorrangig für Autobahnfahrten anzuwenden ist.

ERKLÄRUNG

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Dissertation bis auf die dort angegebene Hilfe selbständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer und eigenen Veröffentlichungen unverändert oder mit Änderungen entnommen wurde.

Ingolstadt, 22.01.2025

.....
Ridon Arifi

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich bisher kein Promotionsgesuch an einer Universität innerhalb oder außerhalb der Bundesrepublik Deutschland gestellt habe.

Ingolstadt, 22.01.2025

.....
Ridon Arifi

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meiner Promotionszeit motiviert, unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank geht an meinen Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die stets fachliche, richtungsweisende und wissenschaftliche Betreuung während meines Vorhabens. Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Ein großer Dank gilt Stephan Berlitz, Dr. rer. nat. Michael Kruppa, Andre Hainzlmaier und Dr. Ing. Tilman Armbruster für die Möglichkeit die Dissertation im Rahmen einer Kooperation mit der AUDI AG anfertigen zu dürfen.

Mein herzlicher Dank gilt meinem fachlichen Betreuer seitens der AUDI AG Valentin Schmidt für jegliche Unterstützung im Rahmen dieser Arbeit. Zudem danke ich meinem Kollegen Marcel Debelec für seine fachliche Unterstützung sowie motivierenden Zuspruch über die gesamte Promotionszeit.

Den Kolleginnen und Kollegen des Lichttechnischen Instituts sowie meiner Abteilung bei der AUDI AG danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die vielseitigen Anregungen. Besonders hervorheben möchte ich Dr. Ing. Klaus Trampert und meine ehemalige Kollegin Dr. Ing. Melanie Helmer, welche stets mit kritischen und konstruktiven Diskussionen zur Seite standen.

Ein besonderer Dank gilt meinen studentischen Mitarbeitern, die mit ihren Untersuchungen und Ergebnissen maßgeblich zum Gelingen

DANKSAGUNG

dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Habib und Hava sowie meinen Geschwistern Rinor und Edona, die mich über den gesamten Lebensweg in meinen Vorhaben grenzenlos unterstützten und motivierten.

INHALTSVERZEICHNIS

Abstract	I
Kurzfassung	III
Danksagung	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	3
2 Grundlagen	5
2.1 Aktuelle Scheinwerfersysteme	5
2.1.1 Aufbau von Kraftfahrzeugscheinwerfern	5
2.1.2 Hochauflösende Projektionsmodule	6
2.1.3 Kamerabasierte Lichtfunktionen	8
2.1.4 Scheinwerferereinstellung und -kalibrierung	9
2.2 Photogrammetrie	11
2.2.1 Kamerasysteme	12
2.2.2 Stereosysteme	14
2.2.3 Kalibrierung optischer Systeme	16
2.3 Visuelle Wahrnehmung	19
2.3.1 Kontrast	19
2.3.2 Auflösungsvermögen	21
2.3.3 Temporäre Lichtartefakte	23
3 Photogrammetrische Ermittlung der Scheinwerferfehlstellung	27
3.1 Stand der Technik	27

INHALTSVERZEICHNIS

3.2	Systembeschreibung und Anforderungen	30
3.2.1	Aufbau des Versuchsträgers	30
3.2.2	Technische Beschreibung der Komponenten . .	32
3.2.3	Anforderungen an die Scheinwerferkalibrierung	34
3.3	Mathematische Beschreibung des Stereosystems	36
3.3.1	Koordinatensysteme des Gesamtsystems	36
3.3.2	Modellierung der optischen Systeme	37
3.4	Ermittlung der Scheinwerferfehlstellung	39
3.4.1	Ermittlung der Kameraintrinsik und -extrinsik .	40
3.4.2	Mathematische Beschreibung der Projektionsfläche	42
3.4.3	Koordinatenbeschreibung der charakteristischen Merkmale	43
3.4.4	Ermittlung des Scheinwerferbrennpunkts	46
3.4.5	Berechnung der Fehlstellung des Scheinwerfers	48
3.5	Referenzmessung mittels Scheinwerfereinstellprüfgerät	50
3.5.1	Aufbau und Versuchsdurchführung	50
3.5.2	Ergebnisse	52
3.6	Zusammenfassung und Diskussion	58
4	Methoden für Nicht-Wahrnehmbare Projektionen	65
4.1	Variation der Wellenlänge	65
4.2	Räumliche Modulation der Projektion	66
4.3	Zeitliche Modulation der Projektion	69
5	Experimentelle Untersuchungen: Wahrnehmung von Projektionen	75
5.1	Optische Ausprägung der Projektionen	75
5.1.1	Bestimmung des charakteristischen Merkmals .	76
5.1.2	Ermittlung der Modulationstiefe	78
5.1.3	Bestimmung der zeitlichen Modulationsfrequenz	80
5.1.4	Einfluss der Ortsfrequenz	82

INHALTSVERZEICHNIS

5.2 Vorstudie: Wahrnehmbarkeit von Projektionen im statischen Fall	86
5.2.1 Methodik	86
5.2.2 Versuchsaufbau	88
5.2.3 Versuchsdurchführung	89
5.2.4 Analyse der Ergebnisse	90
5.3 Untersuchung im Verkehrsraum	95
5.3.1 Wahrnehmbarkeit im statischen Fall	96
5.3.2 Erprobungsfahrt zur Bewertung zeitlich modulierter Projektionen	100
5.4 Probandenstudie: Wahrnehmbarkeit zeitlich modulierter Projektionen im Fahrbetrieb	105
5.4.1 Methodik	106
5.4.2 Versuchsaufbau	109
5.4.3 Datenakquise	112
5.4.4 Studiendurchführung	113
5.4.5 Analyse der Ergebnisse	115
6 Fazit und Ausblick	123
6.1 Zusammenfassung	123
6.2 Handlungsempfehlung	125
6.3 Ausblick	128
Literatur	131
Eigene Veröffentlichungen	145
Betreute Arbeiten	147
Abbildungsverzeichnis	149
Tabellenverzeichnis	157

INHALTSVERZEICHNIS

A Referenzmessung	159
A.1 Aufnahmen der Fehlstellungen	159
A.2 Auswertung: Fehlstellungsdetektion	163

Kapitel 1

EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Frontbeleuchtungssysteme bilden einen wesentlichen Sicherheitsaspekt für die Teilnahme am Straßenverkehr. Gerade bei nächtlichen Fahrten, in denen die Sicht durch vorherrschende Umgebungsbedingungen maßgeblich eingeschränkt ist, verbessert eine optimale Ausleuchtung des Verkehrsbereichs die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer erheblich. Schließlich erfolgt der überwiegende Anteil der Informationsaufnahme im Straßenverkehr über das visuelle System. [1]

Die technologische Evolution der Scheinwerfersysteme von klassischen Halogenscheinwerfern bis hin zu komplexen, modularen LED-Scheinwerfersystemen trägt zu einer verbesserten Sicht im Verkehr bei, jedoch erfordern die Systeme eine akkurate Einstellung und Kalibrierung, um eine präzise und ordnungsgemäße Ausleuchtung bei minimaler Blendung zu gewährleisten. Ein zu niedrig eingestellter Scheinwerfer resultiert in einer reduzierten Sichtweite, während ein zu hoch eingestellter Scheinwerfer zur Blendung von Verkehrsteilnehmern führt.

Gemäß der jährlichen Veröffentlichung des Technischen Überprüfungsvereins (TÜV) sind steigende Mängelquoten bei der Hauptuntersuchung (HU) über die letzten Jahre zu erkennen, wobei die Frontbeleuchtung die häufigste Mängelkategorie darstellt. [2], [3] Der jährlich

EINLEITUNG

durchgeföhrte Licht-Test belegt die Mängel und zeigt, dass 8,2 % aller untersuchten Fahrzeuge eine zu hohe und 7,4 % eine zu niedrige Einstellung der Abblendlichtverteilung aufweisen. [4]

Im Hinblick auf die Integration segmentierter und hochauflösender Lichtmodule, welche eine situationsbedingte, adaptive Lichtverteilung bis hin zu Musterprojektionen ermöglichen [5], [6], ist die horizontale Einstellgenauigkeit gleichermaßen von hoher Bedeutung. Für eine korrekte Funktionsausführung ist eine präzise Einstellung und Kalibrierung der Lichtmodule essenziell.

Die Einstellung der Scheinwerfer erfolgt grundsätzlich am Ende der Produktionslinie und über die weitere Nutzungsdauer des Fahrzeugs lediglich bei Wartungen und Inspektionen. Die Scheinwerfermodul- le erfahren jedoch über die Nutzungsdauer hinweg Alterungseffekte, dynamische, thermische und weitere Einflüsse, welche eine Verschiebung der Lichtverteilung bewirken. [7] Folglich ist eine kontinuierliche Überwachung der Fehlstellung von Scheinwerfern zielführend.

Moderne Kraftfahrzeuge (KFZ), verfügen über eine Fahrerassistenzkamera (FAS-Kamera), welche unter anderem für die Umsetzung adaptiver Lichtfunktionen verwendet wird. Somit besteht die Möglichkeit, Photogrammetrie unter Verwendung der verbauten Fahrzeughardware als Messverfahren zur Fehlstellungsdetektion anzuwenden, bei gleichzeitiger Minimierung personeller Toleranzen. Dabei fungieren charakteristische Merkmale in Form von Musterprojektionen als Referenzpunkte für die geometrische Erfassung der Scheinwerferausrichtung. Unter Gewährleistung einer ECE-konformen Lichtverteilung [8], [9] wäre somit eine kontinuierliche Fehlstellungsdetektion über die Nutzungsdauer des Fahrzeugs realisierbar.

1.2 ZIELSETZUNG

Die dargestellte Problematik und die Notwendigkeit präzise ausgerichteter Scheinwerfermodule motivieren die Untersuchung und Umsetzung einer Fehlstellungsdetektion über die Nutzungsdauer des Fahrzeugs.

Zwar existieren bereits Ansätze für die Fehlstellungsdetektion von Scheinwerfern [10]–[12], jedoch liegen keine Untersuchungen für hochaufgelöste Module vor. Totzauer [10] bestätigt in seinen Untersuchungen die Realisierbarkeit einer dynamischen Onlinekalibrierung, welche die Fehlstellung der Scheinwerfer unter Verwendung einer sichtbaren Kalibriermarke liefert, jedoch ohne Berücksichtigung einer gesetzeskonformen Lichtverteilung. Folglich ist für eine Anwendung im öffentlichen Verkehrsraum eine regelkonforme Ausprägung der charakteristischen Merkmale erforderlich.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und Entwicklung einer Methodik für eine nicht wahrnehmbare Fehlstellungsdetektion für Scheinwerfermodule, lediglich unter Verwendung der integrierten Fahrzeugkomponenten. Infolgedessen resultiert ein Ansatz, welcher eine kontinuierliche Überwachung der Scheinwerferfehlstellung, ohne die Notwendigkeit eines Scheinwerferfeinstellprüfgeräts (SEP), ermöglicht. Eine Validierung mittels Referenzmessung soll Auskunft darüber geben, welche Genauigkeiten bei der Fehlstellungsdetektion erreicht werden. Zudem liegt der Fokus auf einer gesetzeskonformen optischen Ausprägung der zu vermessenden Lichtverteilung, sodass die Methode im Verkehrsraum Anwendung finden kann. Ferner resultieren aus den Untersuchungen Anforderungen, unter denen das Verfahren eingesetzt werden kann.

Kapitel 2

GRUNDLAGEN

2.1 AKTUELLE SCHEINWERFERSYSTEME

2.1.1 AUFBAU VON KRAFTFAHRZEUGSCHEINWERFERN

Moderne Kraftfahrzeugscheinwerfer dienen der optimalen Ausleuchtung bei nächtlichen Fahrten und bieten somit einen grundlegenden Sicherheitsaspekt im Straßenverkehr. Die Aufgabe besteht darin, eine maximale Sichtweite bei geringster Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu ermöglichen. [13]

Scheinwerfersysteme, wie sie in aktuellen Kraftfahrzeugen vorzufinden sind, besitzen einen komplexen Aufbau und eine enorme Funktionalität. Abbildung 2.1 zeigt den digitalen Matrix LED-Scheinwerfer der AUDI AG, welcher als aktueller Stand der Technik gilt.

Neben den Grundfunktionen des Abblend- und Fernlichts sowie der Fahrtrichtungsanzeige, existieren mittlerweile zahlreiche Module und Systeme, welche den Komfort und die Sicherheit im Straßenverkehr erhöhen. Dazu zählen unter anderem das Kurvenlicht, das automatisch abblendende Fernlicht, der sog. Fernlichtassistent (FLA) oder die Leuchtweltenregulierung (LWR), welche eine Anpassung der Lichtverteilung basierend auf dem Nickwinkel des Fahrzeugs bewirkt.

GRUNDLAGEN

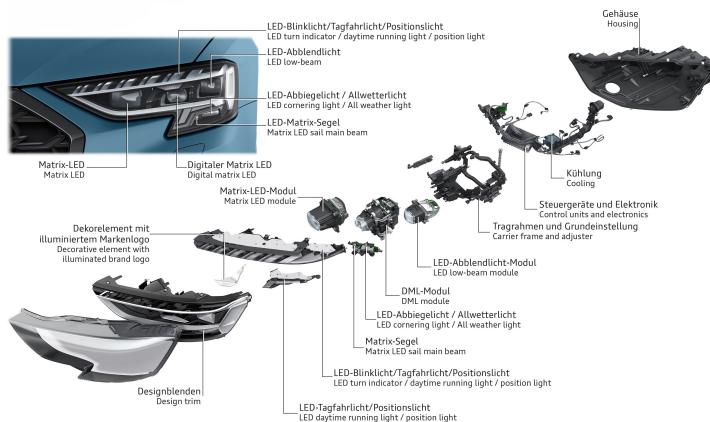


Abbildung 2.1: Aufbau des digitalen Matrix LED-Scheinwerfer [14]

Das Matrix-LED-Modul ermöglicht durch seine spezielle Konstruktion eine segmentierte Lichtverteilung, die den kontinuierlichen Einsatz des Fernlichts erlaubt. Sogenannte Pixellichtsysteme, wie das Digital Matrix LED (DML) können durch eine pixelbasierte Ausgabe nahezu beliebige Lichtverteilungen bis hin zu komplexen Projektionen generieren.

2.1.2 HOCHAUFLÖSENDE PROJEKTIONSMODULE

Hochauf lösende Projektionsmodule, wie sie bereits aus der Medientechnik bekannt sind, erfahren zunehmende Beliebtheit im Automobil. [15]–[17] Sie zeichnen sich durch ihre hochpräzise, pixelbasierte Steuerung aus, die eine hohe Vielfalt an Lichtverteilungen ermöglicht. Diese

Systeme sind in der Lage, komplexe Lichtmuster zu erzeugen, welche sich flexibel an situative Anforderungen anpassen lassen. Insbesondere können sie dazu verwendet werden, gezielte Projektionen auszugeben, die entweder als visuelle Assistenz oder als Warnsignale zur Erhöhung der Verkehrssicherheit dienen.

Zur Erzeugung variabler Lichtverteilungen stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Kauschke [18] führt dabei die additive, subtraktive und variable optische Erzeugung als Methoden an. Additive Systeme umfassen beispielsweise LED-Arrays, während subtraktive Systeme Technologien wie Digital Micromirror Devices (DMDs) oder Flüssigkristall-Displays (LCDs) verwenden. Zu den variablen optischen Systemen zählen hingegen scannende Scheinwerfer.

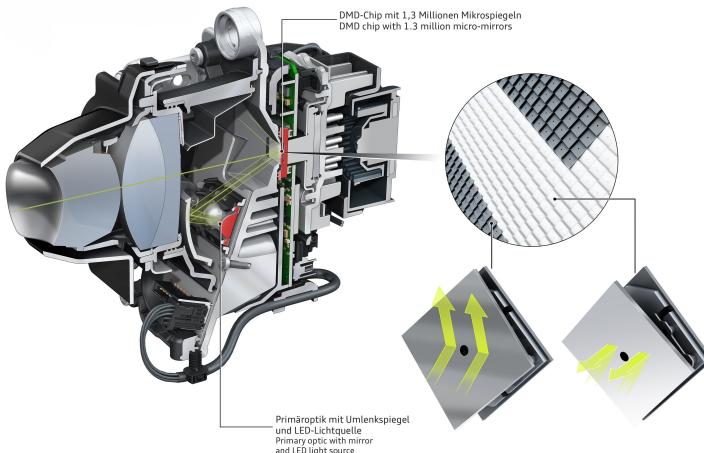


Abbildung 2.2: Aufbau des DML-Moduls [19]

Für die vorliegende Arbeit wird das im weiteren Verlauf untersuchte

DML-Modul betrachtet. Abbildung 2.2 zeigt das DML-Modul, welches auf der DMD-Technologie basiert.

Die DMD-Technologie wird als reflektives System kategorisiert, d.h. die Strahlung der Lichtquelle wird von einem Modul reflektiert. Das DMD besteht aus einzelnen Mikrospiegeln, welche individuell angesteuert werden können. Diese besitzen zwei definierte Endzustände, in denen sie entweder das Licht durch die Projektionslinse führen (An-Zustand) oder das Licht auf einen Absorber richten (Aus-Zustand). [20] Somit wird das auszugebende Bild subtraktiv erzeugt. Das Licht ungenutzter Pixel ist zwar kontinuierlich vorhanden, wird jedoch durch die Ablenkung in einen Absorber nicht aktiv genutzt, was im Vergleich zu additiven Systemen zu einem geringeren Systemwirkungsgrad führt.

2.1.3 KAMERABASIERTE LICHTFUNKTIONEN

Wie in den vorangegangen Kapiteln dargelegt, existiert eine Vielzahl von Lichtfunktionen, welche dem Fahrzeugführer zusätzlichen Komfort bieten und insbesondere die Sicherheit erhöhen. Einige der Lichtfunktionen werden teilweise zusätzlich durch ein hochauflösendes Modul erweitert. Einige solcher Funktionen sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Die Lichtassistenzfunktionen werden dabei überwiegend unter Verwendung der integrierten Fahrerassistenzkamera realisiert.

Die FAS-Kamera erfasst die Umgebung vor dem Fahrzeug und liefert die erforderlichen Daten zur Berechnung der Lichtverteilung. Dabei werden Verkehrsteilnehmer, Objekte, Fahrbahnmarkierungen sowie weitere relevante Umgebungsmerkmale detektiert. Auf Grundlage dieser Informationen erfolgt eine adaptive Anpassung der Lichtverteilung, indem die Pixel individuell angesteuert werden. Die ordnungs-

gemäße Ausführung der Lichtfunktionen setzt ein vollständig kalibriertes Gesamtsystem voraus, das sowohl die FAS-Kamera als auch das Projektionsmodul umfasst.

Für eine ausführliche Darstellung der Lichtfunktionen sei auf [6] verwiesen.

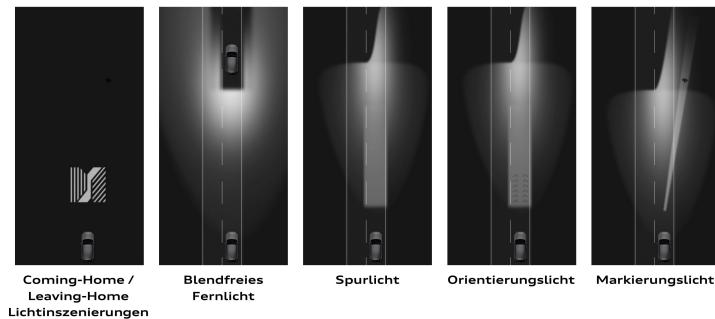


Abbildung 2.3: DML-basierte Lichtfunktionen [21]

2.1.4 SCHEINWERFEREINSTELLUNG UND -KALIBRIERUNG

SCHEINWERFEREINSTELLUNG

Die korrekte Einstellung der Scheinwerfer ist ein zentraler Aspekt der Fahrzeugbeleuchtung, da sie sowohl die Sicherheit des Fahrers als auch die anderer Verkehrsteilnehmer maßgeblich beeinflusst. Ein falsch eingestellter Scheinwerfer kann zu einer verminderten Sichtweite des Fahrzeugführers oder zur Blendung weiterer Verkehrsteilnehmer führen. [22] Die UN/ECE-Regelungen Nr. 48 und Nr. 112 [8],

[9] legen die spezifischen Anforderungen fest, die für eine korrekte Einstellung von Scheinwerfern erfüllt sein müssen.

Am Ende der Produktionslinie erfolgt die Scheinwerfereinstellung für jedes Fahrzeug gemäß den gesetzlichen Vorgaben. Dabei wird die Hell-Dunkel-Grenze (HDG), die sich aus einem horizontalen und einem ansteigenden Abschnitt zusammensetzt, auf einen Messschirm in 10 Metern Entfernung projiziert. Das Abblendlicht wird mittels Einstellschrauben so justiert, dass der horizontale Teil der HDG um $0,57^\circ$ nach unten geneigt ist, relativ zur Fahrzeuglängsachse. Für die korrekte horizontale Ausrichtung der Scheinwerfer dient der Knickpunkt der HDG als Referenz. Gemäß der Richtlinien für die Überprüfung der Einstellung der Scheinwerfer von Kraftfahrzeugen bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO (HU-Scheinwerfer-Prüfrichtlinie) gilt eine Einstelltoleranz von $\pm 0,5\%$ [23]. Bei Überschreiten des Wertes liegt ein erheblicher Mangel vor, wodurch ein negatives Prüfergebnis vorliegt.

Eine präzise Positionierung des Fahrzeugs vor dem Messschirm ist unerlässlich für die korrekte Einstellung. Außerdem müssen die Toleranzen der Bodenfläche oder Prüfoberfläche, auf der das Fahrzeug steht, gemäß ISO 10604 [24] berücksichtigt werden, da sie Einfluss auf das Ergebnis der Scheinwerfereinstellung haben.

Eine häufig angewandte Methode zur Scheinwerfereinstellung ist die Verwendung eines Scheinwerfereinstellprüfgeräts (SEP). Dieses Gerät projiziert die 10 m entfernte Lichtverteilung mithilfe einer Fresnellinse auf eine verkleinerte Strecke von 50 cm innerhalb des Geräts. Dadurch wird der große Platzbedarf für eine direkte Projektion vermieden, ebenso wie die Notwendigkeit einer umfangreichen Projektionsfläche.

SCHEINWERFERKALIBRIERUNG

Die Kalibrierung von Scheinwerfern umfasst die präzise Bestimmung der Position und Orientierung des zu kalibrierenden Moduls zu einem festgelegten Bezugssystem, wie dem Kamerakoordinatensystem oder dem Fahrzeugkoordinatensystem. Hochauflösende Module (bis zu 1,3 Mio. Pixel) oder segmentierte Module (< 100 Pixel) können für die Realisierung von blendfreiem Fernlicht eingesetzt werden. Die FAS-Kamera erfasst vorausfahrende oder entgegenkommende Verkehrsteilnehmer und ermöglicht durch Positionsinformationen eine Deaktivierung blendender Bereiche. Voraussetzung für die korrekte Entblendung ist die Kenntnis über die Lage und Orientierung der Projektionsmodule. Die Kalibrierung der genannten Module erfolgt grundsätzlich mittels SEP. Dazu werden Referenzsegmente der Module aktiviert und das SEP orthogonal auf die optische Achse zentriert. Anschließend ermittelt das Gerät kamerabasiert die Abweichung der Module von der Soll-Position. Die Daten werden im Anschluss im Steuergerät hinterlegt, sodass bei dieser Prozedur, im Gegensatz zum Scheinwerfereinstellprozess, keine mechanische Justierung der Module erfolgt. [25]

2.2 PHOTOGRAMMETRIE

Photogrammetrie beschreibt im Allgemeinen berührungslose Messverfahren zur indirekten Erfassung der Geometrie und Lage eines Objekts anhand einer oder mehrerer Bildaufnahmen. Präzise Bildmessungen erlauben die Rekonstruktion von Form und Lage des

Objekts, während dessen inhaltliche Merkmale durch Bildinterpretation abgeleitet werden. Grundsätzlich finden photogrammetrische Verfahren in allen Bereichen Anwendung, in denen das Messobjekt fotografisch erfasst und die gewonnenen Bilddaten ausgewertet werden können.

Eine vereinfachte Darstellung des photogrammetrischen Prozesses ist Abbildung 2.4 zu entnehmen. Aus den erfassten Aufnahmen werden geometrische (Position im Bild) und radiometrische (Intensität, Grauwert, Farbwert) Informationen extrahiert, wobei eine Kalibrierung vorausgesetzt wird. Basierend auf mathematischen Modellen kann das Objekt rekonstruiert und modelliert werden. [26]

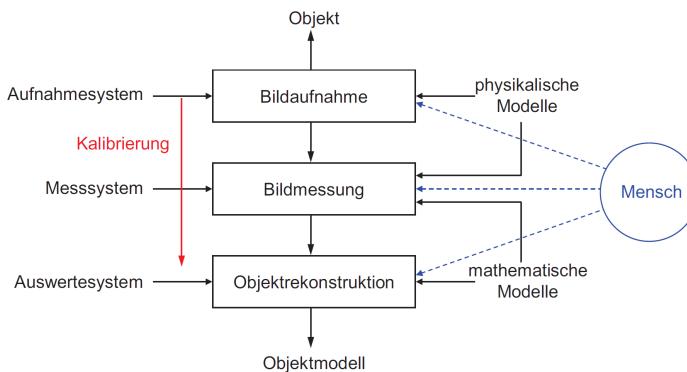


Abbildung 2.4: Der photogrammetrische Prozess [26]

2.2.1 KAMERASYSTEME

Im Fahrzeug existieren diverse Sensoren, um eine umfassende Erfassung der Umgebung und deren Verarbeitung zu ermöglichen. Dazu

zählen neben Radar-, Lidar- und Ultraschallsensorik auch Kamerasysteme, die speziell für die optische und infrarote Informationsaufnahme zuständig sind.

Im Rahmen der Lichtsteuerung spielen Kamerasysteme eine zentrale Rolle, da sie die notwendigen Objektinformationen liefern, um die Lichtverteilung adaptiv anzupassen. Die FAS-Kamera erfasst dabei wichtige Umgebungsdaten wie Verkehrsteilnehmer, Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen oder weitere Objekte sowie deren Position relativ zum Fahrzeug. Anhand dieser Daten ist eine gezielte Steuerung der Lichtverteilung möglich, um die Fahrbahnausleuchtung zu optimieren und Lichtassistenzfunktionen zu realisieren.

Abbildung 2.5 visualisiert die Abfolge der einzelnen Schritte im Bildaufnahmeprozess.

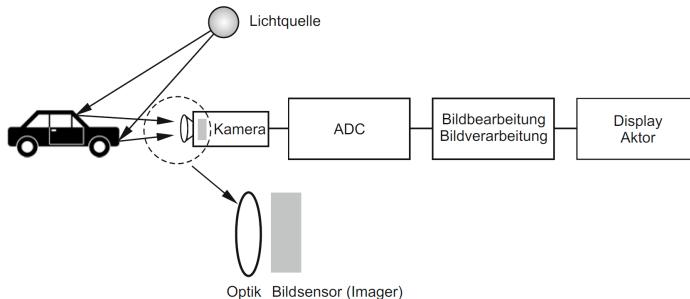


Abbildung 2.5: Prozesskette: Bildaufnahme [13]

Licht, welches von einem Objekt emittiert oder reflektiert wird, gelangt über das optische System der Kamera auf den Bildsensor. Der

lichtempfindliche Sensor wandelt die Informationen in elektrische Signale um, welche anschließend digitalisiert und durch entsprechende Algorithmen verarbeitet werden. Dieser Prozess bewirkt eine Transformation der 3D-Weltkoordinaten zu 2D-Bildkoordinaten, wobei die Tiefeninformationen aufgrund der Reduktion auf die Bildebene verloren gehen. Durch mehrere Aufnahmen aus verschiedenen Positionen können Tiefeninformationen gewonnen werden.

2.2.2 STEREOSYSTEME

Stereosysteme sind optische Systeme, die mithilfe von zwei Kameras die dreidimensionale Erfassung von Objekten ermöglichen. Ein Objekt wird von beiden Kameras gleichzeitig aus unterschiedlichen Perspektiven erfasst, was die Gewinnung von Tiefeninformationen ermöglicht. Das Prinzip der Stereoskopie, das der Funktionsweise des menschlichen Sehens ähnelt, bildet die Grundlage. Hierbei werden zwei leicht versetzte Bilder genutzt, um die Tiefenstruktur eines Objekts zu berechnen.

Ein zentrales Verfahren ist die Triangulation - ein mathematisches Prinzip, das verwendet wird, um die Position eines Objektpunkts im dreidimensionalen Raum zu bestimmen, indem die Unterschiede in den Bildpositionen (Disparität) dieses Punktes in den beiden Kamerabildern gemessen werden.

Für den erfolgreichen Einsatz von Stereosystemen sind jedoch bestimmte Voraussetzungen erforderlich, darunter die Kamerakalibrierung. Sie ist entscheidend, um akkurate Tiefeninformationen zu gewinnen. Unkalibrierte oder mangelhaft kalibrierte Kameras resultieren in fehlerhaften 3D-Rekonstruktionen und beeinträchtigen die Messgenauigkeit erheblich. [26], [28]

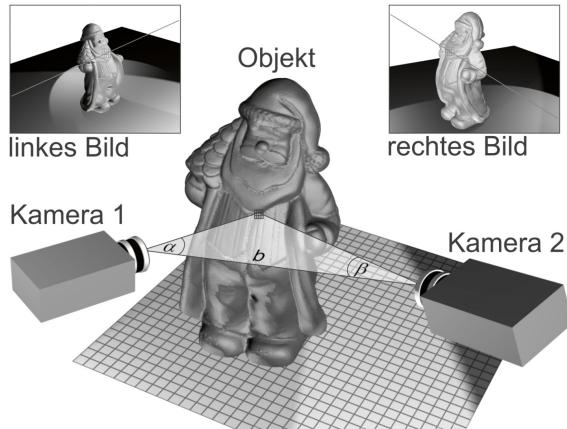


Abbildung 2.6: Prinzip der Triangulation [27]

Eine weitere Notwendigkeit sind Algorithmen, welche zugehörige Bildkorrespondenzen beider Bilder ermitteln. Gerade bei besonders variierenden Beleuchtungsverhältnissen oder strukturlosen/homogenen Oberflächen, wie beispielsweise bei Verkehrsstraßen, steigt die Herausforderung, da sich die Zuordnung von Korrespondenzpunkten erheblich erschwert. [27]

Durch den Einsatz eines optischen Systems, wie etwa eines Projektionsmoduls, lassen sich notwendige Strukturen und Merkmale aktiv in die Szene einbringen. Ein vergleichbares System findet sich bei der Anwendung im Fahrzeug. Das Stereosystem, welches das Prinzip der aktiven Triangulation nutzen kann, setzt sich in diesem Fall aus je einem Scheinwerferprojektionsmodul und der integrierten FAS-Kamera zusammen und bedarf ebenfalls einer präzisen Kalibrierung.

2.2.3 KALIBRIERUNG OPTISCHER SYSTEME

KAMERAKALIBRIERUNG

Die Kamerakalibrierung ist ein essenzieller Prozess in der Bildverarbeitung und Photogrammetrie, der darauf abzielt, die Abbildungsparameter eines Kamerasystems präzise zu bestimmen. Dieser Prozess dient dazu, systematische Verzerrungen und Abbildungsfehler zu korrigieren, die durch die optischen und geometrischen Eigenschaften der Kamera hervorgerufen werden. Sie umfasst die Bestimmung der intrinsischen und extrinsischen Parameter der Kamera.

Die intrinsischen Parameter beschreiben die internen Eigenschaften der Kameraoptik, wie Brennweite f , Hauptpunktverschiebung c und Verzerrungen der Linse. Diese Parameter sind unveränderlich für eine bestimmte Kamera und müssen genau ermittelt werden, um die Bildverzerrungen zu korrigieren. Die extrinsischen Parameter beziehen sich hingegen auf die Position und Orientierung der Kamera relativ zum Weltkoordinatensystem und beschreiben somit die Transformation zwischen dem Kamerakoordinatensystem und dem globalen Koordinatensystem. Eine Kamera wird durch ihr Modell beschrieben, wobei in den meisten Fällen das Lochkameramodell zum Einsatz kommt (vgl. Abbildung 2.7). Für eine detaillierte Beschreibung sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. [26], [28]–[32]

Die Kameraintrinsik lässt sich in folgender Matrix K zusammenfassen:

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

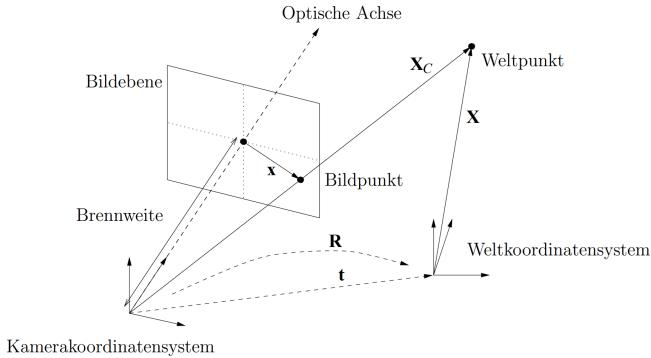


Abbildung 2.7: Modell der Lochkamera [33]

Die Abbildung eines 3D-Punktes in die Bildebene kann mit Hilfe der Kameramatrix beschrieben werden (vgl. 2.2), wobei (x, y) den Pixelkoordinaten des 2D-Bildpunktes und (X, Y, Z) den 3D-Koordinaten des Objektpunktes entsprechen.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Die Kameraextrinsik beschreibt die Translation t und Rotation R der Kamera zu einem Bezugssystem, welches zuvor definiert wird. Somit lässt sich ein Objektpunkt aus dem Weltkoordinatensystem X im Kamerakoordinatensystem X_C wie folgt ausdrücken:

$$X_C = R \cdot X + t \quad (2.3)$$

Unter Verwendung der Gleichungen 2.2 & 2.3 in homogener Koordinatenform kann eine vollständige Beschreibung eines Weltpunkts in Pixelkoordinaten erfolgen:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ w \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} I & | & 0 \end{pmatrix} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Welt- zu Kamerakoordinaten}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{pmatrix}}_{\text{Kamera- zu Pixelkoordinaten}} \quad (2.4)$$

Die Berechnung der Pixelkoordinaten erfolgt anschließend durch die Division von x durch w und y durch w , wodurch die Kollinearitätsgleichungen abgeleitet werden.

Für die Kamerakalibrierung existieren diverse Methoden, darunter die Testfeldkalibrierung und die Selbstkalibrierung. [26], [34] Im Rahmen der Testfeldkalibrierung wird ein präzises 3D-Kalibrierobjekt bekannter Maße verwendet. Aus den bekannten Weltkoordinaten und den erfassten Bildkoordinaten können die Abbildungsparameter der Kamera ermittelt werden. Eine weit verbreitete und geläufige Methode ist die Kalibrierung nach Zhang [35], wobei ein planares Kalibriermuster bekannter Maße aus verschiedenen Perspektiven erfasst und für die Kalibrierung verwendet wird. Die Ermittlung der Abbildungsparameter erfolgt dabei durch die Minimierung des Rückprojektionsfehlers. Bei der Selbstkalibrierung hingegen ist kein Kalibrierobjekt notwendig. Die notwendigen Informationen werden hierbei aus der vorliegenden Szene extrahiert und mittels Bündelausgleichsrechnung bestimmt. [26]

STEREOKALIBRIERUNG

Die Kalibrierung von Stereosystemen kann je Modul oder als Gesamtsystem erfolgen. Dabei ist die Korrespondenzfindung in beiden Bildern essentiell. Gerade bei strukturlosen Szenen finden Projektionsmodule häufig Einsatz. Merkmale können aktiv in die Szene projiziert werden und somit die Korrespondenzsuche erheblich erleichtern. Ziel ist es die entsprechenden Pixelkorrespondenzen in der Bildeckebene der Kamera und in der Bildeckebene des Projektors zu finden. Projektionsmodule sind jedoch keine erfassende Einheit, weshalb eine Aufnahme der Szene durch das Projektionsmodul nicht möglich ist. Dennoch kann das Projektionsmodul als inverse Kamera modelliert und entsprechende Kamerakalibrierverfahren angewendet werden. [36]

Diese Problemstellung wird in zahlreichen Publikationen beschrieben. Neben phasenmodulierten Projektionsmustern, finden auch zeitlich codierte und farbcodierte Strukturlichtverteilungen zur Korrespondenzermittlung Anwendung. [37]–[48]

2.3 VISUELLE WAHRNEHMUNG

2.3.1 KONTRAST

Kontrast ist ein fundamentaler Bestandteil der visuellen Wahrnehmung und beschreibt den Unterschied der Leuchtdichten zwischen einem Objekt L_O und seiner Umgebung L_U in einem visuellen Feld.

Der Kontrast kann auf verschiedene Weise berechnet werden, je nachdem, ob es sich um eine homogene Fläche oder ein periodisches Muster handelt. Im Fall homogener Flächen wird häufig der Weber-Kontrast K_W verwendet. Dieser wird wie folgt beschrieben:

$$K_W = \frac{L_O - L_U}{L_U} = \frac{\Delta L}{L_U} \quad (2.5)$$

Ein Objekt wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % erkannt, falls sein Kontrast über dem Schwellkontrast K_S , d.h. dem geringsten vom Menschen wahrnehmbaren Leuchtdichteunterschied ΔL liegt. [49], [50]

Nach Weber-Fechner ist jedoch die Empfindlichkeit über den gesamten Wahrnehmungsbereich nicht konstant, sondern unterliegt einer logarithmischen Abhängigkeit (vgl. Abbildung 2.8).

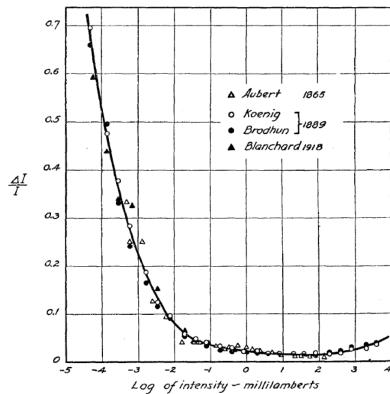


Abbildung 2.8: Weber-Fechner-Kurve [51]

Für periodische Muster, wie sie beispielsweise bei der Projektion eines Linien- oder Schachbrettmusters auftreten, ist der Michelson-Kontrast K_M - auch Modulationsgrad genannt - eine geeignete Methode zur Kontrastbewertung.

Der Michelson-Kontrast ist gemäß Gleichung 2.6 definiert, wobei L_{\max} und L_{\min} die maximale und minimale Leuchtdichte im untersuchenden visuellen Feld beschreiben.

$$K_M = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (2.6)$$

2.3.2 AUFLÖSUNGSVERMÖGEN

RÄUMLICHE AUFLÖSUNG

Das räumliche Auflösungsvermögen des menschlichen Auges beschreibt die minimale Distanz zwischen zwei Objekten, die erforderlich ist, um sie als separate visuelle Reize wahrzunehmen. Die Auflösung hängt von der Dichte der Sehzellen ab, insbesondere von den Zapfen in der Fovea, welche für das Scharfsehen verantwortlich sind. Die maximale Auflösung wird dabei durch die Lichtbeugung an der Pupille begrenzt. Als Richtwert für das menschliche Auge wird etwa eine Bogenminute angegeben. [52]

Das Beugungslimit lässt sich mit Hilfe des Rayleigh-Kriteriums wie folgt beschreiben:

$$\Phi = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (2.7)$$

wobei λ die Wellenlänge des einfallenden Lichts und d den Pupillendurchmesser beschreibt. Einhergehend mit der Ortsfrequenz einer Abbildung ist das Kontrastempfinden. Der Zusammenhang ist in Abbildung 2.9 dargestellt und wird als Contrast Sensitivity Function (CSF) bezeichnet. Die Raumfrequenz wird dabei in Linienpaar (lp) pro Grad bzw. cycle-per-degree (cpd) angegeben.

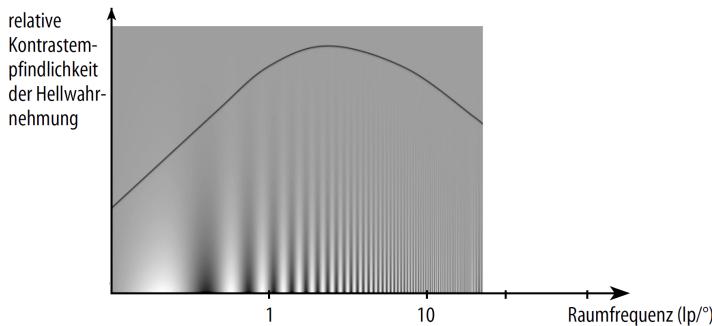


Abbildung 2.9: CSF: Kontrastempfinden und Ortsfrequenz [53]

ZEITLICHE AUFLÖSUNG

Die zeitliche Auflösung des menschlichen Auges beschreibt die Fähigkeit, zeitlich aufeinanderfolgende Lichtreize als getrennt wahrzunehmen. Die Flimmerverschmelzungsfrequenz (engl. Critical Flicker Frequency (CFF)) gibt dabei an, ab welcher Frequenz ein flackerndes Licht als kontinuierlich wahrgenommen wird. Typischerweise liegt die CFF für das menschliche Auge bei etwa 60 Hz. Jedoch variiert sie durch verschiedene Faktoren, wie Adaptationszustand des Auges, Alter, Leuchtdichte, Blickfeld, etc. und kann somit situationsbedingt

deutlich darunter und darüber liegen. [50], [53]–[57] Bei niedriger Lichtintensität liegt die CFF bei etwa 25 Hz, während sie bei höheren Intensitäten bei bis zu 100 Hz liegen kann. [58]

Der Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte und der CFF wird durch das Ferry-Porter-Gesetz beschrieben. Ein logarithmischer Anstieg der Leuchtdichte resultiert in einem linearen Anstieg der CFF,

$$CFF = a \cdot \log(L_m) + b \quad (2.8)$$

wobei a einer personenspezifischen Konstante, welche für gewöhnlich bei 12 Hz liegt, entspricht. [59] Der Parameter b ist abhängig von den Extremwerten der Leuchtdichte während der Modulation [55] und L_m beschreibt die mittlere Leuchtdichte über die Periodendauer.

Somit ist die zeitliche Auflösung ein entscheidender Faktor für die Wahrnehmung bewegter Bilder und die Gestaltung von Bildausgaben, bei denen Flimmern vermieden werden soll.

2.3.3 TEMPORÄRE LICHTARTEFAKTE

Temporale Lichtartefakte (TLA) beschreiben visuelle Effekte, die auf zeitlichen Schwankungen der Intensität oder der spektralen Verteilung eines Lichtreizes für einen menschlichen Beobachter basieren. Dazu zählen Lichtflimmern (Flicker) und Stroboskopeffekte. Es existieren zwei Haupttypen: das chromatische Flimmern, das durch Veränderungen der spektralen Zusammensetzung des Lichts entsteht, und das Leuchtdichteflimmern, bei dem der Lichtstrom zeitlich-periodisch

schwankt. Chromatisches Flimmern tritt in der Regel selten auf, weshalb Leuchtdichteflimmern im Allgemeinen als TLA bezeichnet wird. [58], [60]

FLIMMERN

Flimmern beschreibt die visuelle Wahrnehmung von Unregelmäßigkeiten, die durch zeitliche Schwankungen der Leuchtdichte oder der spektralen Verteilung eines Lichtreizes ausgelöst werden. Diese Erscheinung tritt für einen unbewegten Beobachter in einer statischen Umgebung auf. [61]

STROBOSKOPEFFEKTE

Stroboskopeffekte treten für einen statischen Beobachter in einer dynamischen Umgebung auf. Der Effekt wird ebenfalls durch eine Unstetigkeit in der Intensität des Lichtreizes verursacht. Bewegt sich ein Objekt im Bereich von moduliertem Licht, so entstehen bei der Verarbeitung der Lichtimpulse Bilder an unterschiedlichen Stellen der Netzhaut. Abbildung 2.10 visualisiert den stroboskopischen Effekt.

GEISTERBILDER

Geisterbilder beschreiben eine Änderung der wahrgenommenen Form oder der räumlichen Position von Objekten, deren Leuchtdichte oder spektrale Verteilung zeitlich schwankt. Sie treten für einen nicht statischen Beobachter in einer statischen Umgebung auf. Charakteristisch für dieses Phänomen sind vor allem Sakkaden - schnelle Augenbewegungen bei der Änderung des Fixationspunkts -, die dazu führen,

dass mehrere Abbildungen eines Objekts auf der Netzhaut entstehen, was den Eindruck einer Positionsveränderung des betrachteten Gegenstands erzeugt.

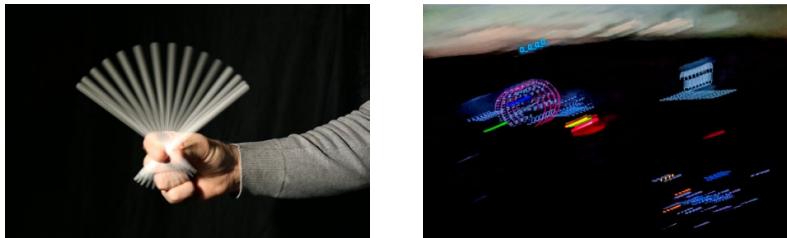


Abbildung 2.10: Stroboskopeffekt (links) und Geisterbild (rechts) [62]

Kapitel 3

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

3.1 STAND DER TECHNIK

Aus der Literatur- und Patentrecherche geht hervor, dass bereits zahlreiche Ansätze für eine automatische Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung existieren. [63]–[82] Einige Verfahren nutzen die bereits präsente Lichtverteilung, während andere Ansätze eine zusätzliche Projektion einer Kalibriermarke erfordern. In jedem Fall dient die integrierte FAS-Kamera als Messinstrument. Die meisten Verfahren fokussieren sich dabei auf eine korrekte Einstellung des Abblendlichts, wobei hier vor allem die vertikale Ausrichtung des Abblendlichts von großer Bedeutung ist. Durch die Integration segmentierter und hochauflösender Lichtmodule, welche adaptive Lichtfunktionen ermöglichen, entsteht zusätzlich die Notwendigkeit hinsichtlich der horizontalen Einstell- und Kalibriergenauigkeit.

Die größte Relevanz in Bezug auf die Methodik dieser Arbeit liefern die Untersuchungen von Totzauer [10], Söhner [11] und Schneider [12].

Totzauer verwendet bei seinem Ansatz eine am Scheinwerfermodul gekoppelte Zusatzoptik, welche eine für den Fahrzeugführer nicht

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

sichtbare Lichtmarkierung auf die Straße projiziert. Nicht sichtbar beschreibt in diesem Fall den Nahbereich vor der Fahrzeugfront, welcher nicht im Sichtfeld des Fahrers liegt, jedoch im Sichtfeld der Kamera. Für die Fehlstellungsermittlung wird die Ist-Position der Markierung durch die FAS-Kamera erfasst und mit einer hinterlegten Soll-Position verglichen. Basierend auf dieser Abweichung erfolgt die Ermittlung der Fehlstellung in horizontaler und vertikaler Richtung. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Beziehung zwischen dem Ego-Fahrzeug und der Fahrbahn bekannt ist. Voraussetzung für die Methodik ist jedoch eine ebene Fahrbahn, welche beispielsweise bei Autobahnen und Bundesstraßen vorzufinden ist. Vorteilhaft ist eine dauerhaft mögliche Vermessung der Scheinwerferpose im Fahrbetrieb, ohne visuelle Wahrnehmung durch den Fahrzeugführer. Als Nachteil können die Kosten für eine Zusatzoptik je Scheinwerfermodul sowie der Einfluss nicht berücksichtigter mechanischer Toleranzen zwischen Fahrzeug und Fahrbahn genannt werden. Zudem erfolgt die Projektion im Nahbereich der Fahrzeugfront, wodurch aufgrund des geringen geometrischen Hebels die Sensitivität zur Erkennung geringer Abweichungen begrenzt ist.

Söhner entwickelt im Rahmen seiner Dissertation ein Konzept für eine automatische Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation. Ein geometrisches Modell, bestehend aus einer kalibrierten Kamera und Scheinwerfermodulen mit bekannten Anbaupositionen, bildet hierbei die Basis. Die Scheinwerfer verfügen über eine Stellmotorik, welche für eine Verlagerung des Lichtbilds verwendet wird. Durch eine definierte Verlagerung des Knickpunkts der HDG, welcher als charakteristisches Merkmal dient, ergeben sich notwendige Informationen für die Lösung des zugrunde liegenden Gleichungssystems und somit der Scheinwerferfehlstellung in horizontaler und vertikaler Richtung. Söhner erreicht bei der Ermittlung der Fehlstellung eine Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ$. Die Anbautoleranzen der FAS-Kamera und Scheinwerfer-

module werden in diesem Verfahren vernachlässigt. Zudem findet der Ansatz in der Serienarchitektur keine Anwendung.

Basierend auf Söhners Ansatz erweitert Schneider die Methode für den Einsatz in grobaufgelösten, segmentierten Scheinwerfermodulen. Aufbauend auf einer Initialkalibrierung, welche den Brennpunkt eines Scheinwerfers ermittelt, erfolgt eine Online-Rekalibrierung der Module durch einen Soll-Ist-Vergleich sog. Projektionsendpunkte. Das kalibrierte Gesamtsystem fungiert als stereobasierte Sensorik für eine Tiefenwahrnehmung für nahe bis mittlere Distanzen und nutzt dabei das Prinzip der aktiven Triangulation. Da eine konstante Systemgeometrie zur Erfassung von Trainings- und Testdaten nicht vorliegt, erfolgt kein Einsatz in der Serienarchitektur.

Für alle drei Ansätze werden charakteristische Merkmale innerhalb der Lichtverteilung verwendet. Während Totzauer und Schneider Merkmale aktiv in die Szene projizieren, verwendet Söhner vorhandene Charakteristika der Abblendlichtverteilung. In jedem Fall ist die Ausprägung der Merkmale visuell sichtbar und somit beim Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr hinsichtlich gesetzlicher Vorgaben eingeschränkt.

Die Problemstellung einer Kamera-Projektor-Kalibrierung ist fundamentaler Bestandteil der Photogrammetrie und ermöglicht vielzählige Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Bereichen, wie beispielsweise in der Medizintechnik [83]–[87], der Produktionstechnik [88]–[91] oder zur Umweltrekonstruktion [92], [93]. Dabei werden Stereosysteme verwendet, um diverse Messaufgaben oder Objektrekonstruktionen zu realisieren. Publikationen für verschiedene Verfahren sind bereits in Kapitel 2.2.2 dargelegt. Das Prinzip ist in den meisten Fällen identisch. Projektoren werden als inverse Kamera modelliert und die Abbildungsparameter mit Hilfe von Kamerakalibreralgorithmen ermittelt. In jedem Fall ist für die präzise Bestimmung der Parameter

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

die Aufnahme aus verschiedenen Posen zum Kalibrierobjekt erforderlich. Übertragen auf das Fahrzeug bedeutet das, dass entweder das Kalibrierobjekt oder die Ausrichtung des Fahrzeugs verändert werden muss. Für den Kalibriervorgang in der Produktion würde dies eine zusätzliche, bewegliche Vorrichtung für das Kalibrierobjekt oder ausreichend Platz zum Bewegen des Fahrzeugs erfordern, ebenso bei der Kalibrierung in Werkstätten.

Die Möglichkeit, etablierte Kalibrierungsmethoden aus der Photogrammetrie auf Anwendungen im Automobilbereich zu übertragen, ist aus theoretischer Sicht gegeben. Für eine umfassende Implementierung müssen jedoch die praktische Umsetzbarkeit und die Wirtschaftlichkeit bewertet werden.

3.2 SYSTEMBESCHREIBUNG UND ANFORDERUNGEN

3.2.1 AUFBAU DES VERSUCHSTRÄGERS

Grundsätzlich sind bei der Realisierung einer Lichtfunktion verschiedene Komponenten beteiligt. Dazu zählen die Scheinwerfermodule, welche für die Ausgabe der Lichtverteilung zuständig sind, Sensorik, welche die Umgebung vor dem Fahrzeug erfasst und diverse Steuergeräte für die Berechnung notwendiger Informationen zur Ausgabesteuerung. Für das segmentierte, blendfreie Fernlicht gilt folgende Prozesskette: Verkehrsteilnehmer und Objekte vor dem Ego-Fahrzeug werden durch die Kamera und weitere Sensorik erfasst. Durch die Fusion verschiedener Sensordaten wird die Position der erfassten Objekte ermittelt. Anhand dieser Informationen wird durch das zentrale

Lichtsteuergerät (zDML) bestimmt, welche Lichtsegmente die erfassten Bereiche ausleuchten und kann diese situationsbedingt steuern. Eine korrekte Ausführung der Funktionen bedingt eine präzise Kalibrierung der Kamera und der Scheinwerfermodule.

Das System, welches im Rahmen dieser Arbeit für die Umsetzung einer automatischen Kalibrierung dient, besteht aus mehreren Komponenten. Die Scheinwerferprojektionsmodule erzeugen die notwendigen Strukturlichtverteilungen, welche durch eine Kameraeinheit erfasst werden. Die akquirierten Bilder werden an einem Messrechner durch mehrere Algorithmen verarbeitet, sodass auf die Fehlstellung der Projektionsmodule geschlossen werden kann.

Für gewöhnlich erfolgt die Ausgabesteuerung der Projektionsmodule durch das zDML. Für die Untersuchungen wird jedoch die Ausgabe der Projektionen über einen Messrechner gesteuert. Die Projektionsmodule werden mit Hilfe einer LVDS-Leitung über einen Serializer an den Messrechner gekoppelt, wodurch das Projektionsmodul als Ausgabegerät für den Messrechner dient, ähnlich der Betriebsweise eines zusätzlichen Monitors. Anstatt die FAS-Kamera zu nutzen, erfolgt die Umsetzung unter Verwendung einer Industriekamera, da der Zugriff auf die Bildinformationen keine zusätzliche komplexe Messtechnik erfordert.

Abbildung 3.1 stellt den Aufbau des Versuchsfahrzeugs vereinfacht dar. Der Messrechner bildet die zentrale Einheit. Er ist für die Steuerung der Kamera und für die Generierung der Lichtverteilung zuständig. Bilder, welche die Kamera erfasst, werden über den Rechner verarbeitet. Gleichzeitig erzeugt der Messrechner die benötigte Strukturlichtverteilung, welche über den Serializer an das ausgebende Modul gelangt. Im weiteren Verlauf kann der Messrechner basierend auf den Bildinformationen der Kamera notwendige Änderungen in der Lichtverteilung berechnen und vornehmen.

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

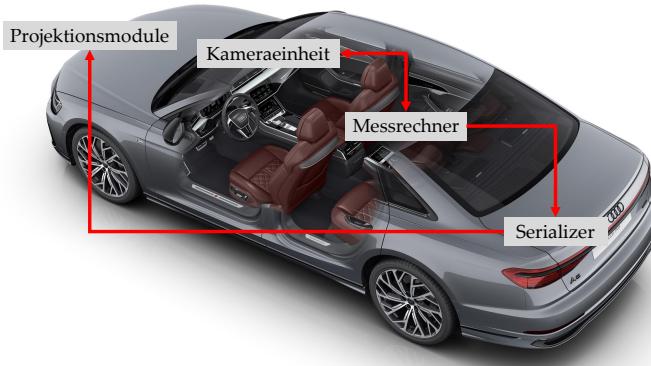


Abbildung 3.1: Aufbau des Versuchsträgers [94]

3.2.2 TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER KOMPONENTEN

Um die Problemstellung der Kalibrierung lösen zu können, ist es erforderlich, das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten zu beschreiben. Dabei soll zunächst auf die Erzeugung der Gesamtlichtverteilung durch die beitragenden Komponenten eingegangen werden. Anschließend erfolgt die Beschreibung der akquirierenden Kameraeinheit.

KOMPONENTE SCHEINWERFER

Die Gesamtlichtverteilung setzt sich je nach Fahrzeugausführung aus verschiedenen Lichtverteilungen zusammen. Abstrahiert dargestellt, lässt sich die Gesamtlichtverteilung aus der Abblendlichtverteilung,

der Fernlichtverteilung (Matrix-Beam) und dem Beitrag durch das Projektionsmodul (DML), welches Teile beider Bereiche abdeckt, beschreiben. Abbildung 3.2 stellt die Gesamtlichtverteilung durch die einzelnen Beiträge dar. Dabei ist ersichtlich, dass sich die Abblendlichtverteilung aus einem Grundlicht durch das Abblendlichtmodul und einem Anteil der Projektionsmodule zusammensetzt. Die Projektionsmodule generieren dabei die erforderliche HDG. Das DML ist an das Abblendlichtmodul mechanisch gekoppelt, sodass eine Justage des Abblendlichts beide Module gleichzeitig beeinflusst.

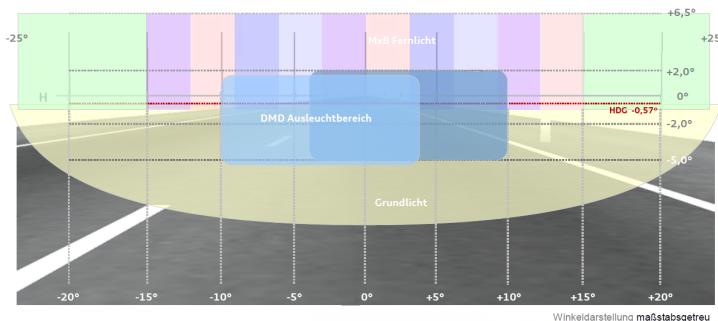


Abbildung 3.2: Zusammensetzung der Gesamtlichtverteilung für einen Audi e-tron [95]

Das Field-of-View (FOV) der DMD-Module umfasst einen Bereich von 14° in der Horizontalen und einen Bereich von 7° in der Vertikalen. Die Module besitzen eine native Auflösung von 1152×1152 Pixel. Im automobilen Bereich werden die Module unter Verwendung eines speziellen Controllers bei einem Seitenverhältnis von 2:1 betrieben, sodass eine Gesamtauflösung von 1152×576 resultiert. Dadurch ergibt sich eine Winkelauflösung von etwa $0,012 \frac{\circ}{\text{Pixel}}$.

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

KOMPONENTE KAMERA

Wie zuvor beschrieben, erfolgt die Untersuchung mittels einer Industriekamera [96] mit entsprechendem Objektiv [97] von BAUMER. Anhand der Datenblätter lassen sich die zuvor berechneten Spezifikationen für die Kamera äquivalent berechnen. Ausgehend von der Auflösung der Kamera (4096×2992) und dem Objektiv-FOV von $60,5^\circ \times 46,2^\circ$ ergibt sich eine Winkelauflösung von etwa $0,015 \frac{^\circ}{\text{Pixel}}$.

3.2.3 ANFORDERUNGEN AN DIE SCHEINWERFERKALIBRIERUNG

Im Wesentlichen erfolgt die Einstellung und Kalibrierung am Ende der Produktionslinie und anschließend bei Bedarf in Werkstätten und beim Kundendienst. Der Prozess erfolgt dabei meist durch Mitarbeiter unter Verwendung eines SEP, wobei inter- sowie intrapersonelle Toleranzen mit einfließen, d.h. Fehlereinflüsse durch individuelle Mitarbeiter. Weiter sind Einflüsse, welche die Soll-Orientierung der Scheinwerfer über dessen Lebensdauer verändern, von Bedeutung. Folglich ist eine Rekalibrierung der Scheinwerfer notwendig, was sich in einem zeit- und kostenintensiven Verfahren widerspiegelt.

Die Verwendung der integrierten Fahrerassistenzkamera erlaubt die Umsetzung eines automatischen, integrierten Kalibrierungsprozesses. Das daraus resultierende Stereosystem, bestehend aus Scheinwerfer und Kamera, ermöglicht damit die Reduktion oder Eliminierung zuvor beschriebener Toleranzen. Durch die Verwendung der integrierten Hardware ist der Kalibervorgang effizient umsetzbar, wodurch der Einsatz eines SEP entfällt und eine stetige Ermittlung der Fehlstellung möglich ist.

Wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben, ist gemäß der Richtlinie für die Überprüfung der Scheinwerfereinstellung eine Toleranz von $\pm 0,5\%$ ($\approx 0,29^\circ$) in horizontaler und vertikaler Richtung vorgegeben. Gemäß Audi-internen Vorgaben liegen die vertikalen Toleranzen am Produktionsband bei $\pm 0,2\%$ und in der Serienüberprüfung (Audit) bei $\pm 0,4\%$. Für die horizontalen Toleranzen sind die Werte auf $\pm 0,3\%$ und $\pm 0,6\%$ respektive festgelegt. Söhner und Schneider erreichen mit ihren Verfahren eine Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ$, welche in etwa den Audi-internen Vorgaben entspricht. Folglich wird dieser Wert im Folgenden als Referenzwert herangezogen.

Der Kalibriervorgang setzt charakteristische Merkmale in der Lichtverteilung voraus, die für den Einsatz im Fahrbetrieb gemäß den ECE-Richtlinien ausgelegt sein müssen, um eine regelkonforme Nutzung im öffentlichen Straßenverkehr sicherzustellen. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass der Vorgang keine negativen Einflüsse auf das Fahrgeschehen ausübt, wodurch die Sicherheit im Fahrbetrieb gewährleistet bleibt.

Da im Rahmen dieser Arbeit keine zusätzlichen Vorrichtungen verwendet werden sollen, erfolgt keine vollständige Ermittlung der Abbildungsparameter der Projektionsmodule. Stattdessen wird der Ansatz von Schneider für ein hochauflösendes Projektionsmodul umgesetzt und validiert. Anschließend kann auf Basis des ermittelten Brennpunkts die Fehlstellung des Scheinwerfers bestimmt werden.

Zusammenfassend resultieren folgende Anforderungen:

- Einsatz in Werkstätten und beim Kundendienst sowie im Fahrbetrieb beim Kunden
→ Entfall der Notwendigkeit für ein SEP

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

- Kein Einsatz zusätzlicher Hardware
 - Kosten- und zeiteffizienter Betrieb
- Messgenauigkeit der Fehlstellungsdetektion $\Delta\varphi, \Delta\theta \leq 0,1^\circ$
 - Ausreichend für eine Scheinwerferfehlstellung gem. Vorgaben
- Nicht wahrnehmbarer Ablauf im Kundenbetrieb
 - Ausschluss negativer Einflüsse im Fahrbetrieb
- Verwendung ECE-konformer Lichtverteilung im Fahrbetrieb
 - Nutzung im öffentlichen Straßenverkehr

3.3 MATHEMATISCHE BESCHREIBUNG DES STEREOSYSTEMS

Im Folgenden wird das Gesamtsystem sowie dessen Komponenten hinsichtlich ihrer geometrischen Beziehungen beschrieben. Anschließend wird auf das verwendete mathematische Modell der Komponenten eingegangen. Durch die Kenntnis der Beziehungen zwischen den Komponenten kann eine mathematische Berechnung der Scheinwerferfehlstellung durchgeführt werden. Grundlage für die Berechnung bietet eine kalibrierte Kamera, was im weiteren Verlauf erläutert wird. Zuletzt erfolgt die Validierung der Messgenauigkeit anhand einer Referenzmessung mittels SEP.

3.3.1 KOORDINATENSYSTEME DES GESAMTSYSTEMS

Als Bezugssystem für alle Koordinatensysteme wird das Weltkoordinatensystem K_W gewählt. Der Ursprung des Weltkoordinatensystems

befindet sich dabei im unteren, rechten Eckpunkt der ersten Kachel des physischen Schachbretts mit bekannten Maßen. Das physische Schachbrett dient als Kalibrierobjekt für die Kamera und als Referenzpunkt für alle weiteren akquirierten Objektpunkte. Weitere relevante Koordinatensysteme sind Abbildung 3.3 zu entnehmen. Die farbigen Punkte markieren den Ursprung des jeweiligen Koordinatensystems. Durch die Bestimmung der Rotation und Translation der Koordinatensysteme zueinander, kann beispielsweise die Überführung von Objektpunkten in Weltkoordinaten zu Kamerakoordinaten erfolgen. Die Bestimmung der Transformation erfolgt im weiteren Verlauf und wird durch die Extrinsik beschrieben.

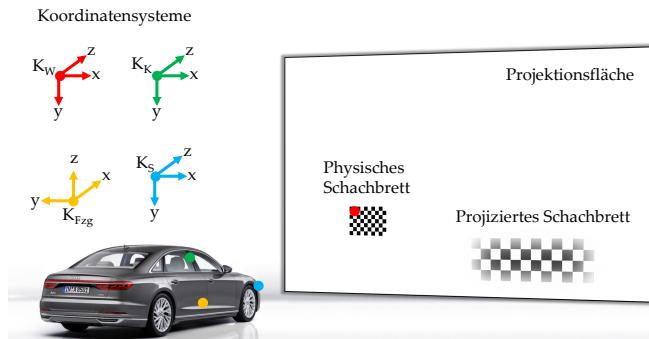


Abbildung 3.3: Koordinatensysteme der Komponenten; die Punkte markieren den Ursprung des jeweiligen Koordinatensystems

3.3.2 MODELLIERUNG DER OPTISCHEN SYSTEME

Zunächst gilt es die Objektkoordinaten X_W der charakteristischen Merkmale im Kamerabild zu beschreiben. Im Rahmen der Kameraka-

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

librierung werden sowohl die intrinsischen als auch die extrinsischen Parameter berechnet, d.h. es werden alle Abbildungsparameter ermittelt, sodass ein Objektpunkt in Weltkoordinaten im Bildkoordinatensystem K_B der Kamera beschrieben wird. Dazu wird die Kamera mit Hilfe des in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Lochkameramodells modelliert (vgl. Abbildung 3.4), was eine Beschreibung der perspektivischen Transformation von 3D-Weltpunkten auf 2D-Bildpunkte erlaubt. Für das Projektionssystem wird ebenfalls das Lochkameramodell angenommen.

Für die Bestimmung der Abbildungsparameter der Kamera erfolgt die Kalibrierung nach Zhang. Dazu wird ein planares Schachbrettmuster in diversen Posen von der Kamera erfasst. Der Algorithmus ist in etablierten Bibliotheken [98], [99] implementiert und kann aus den erfassten Bildern die notwendigen Informationen extrahieren und daraus die Abbildungsparameter bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Kalibrierung der Kamera mit Hilfe der Computer Vision Toolbox von MATLAB.

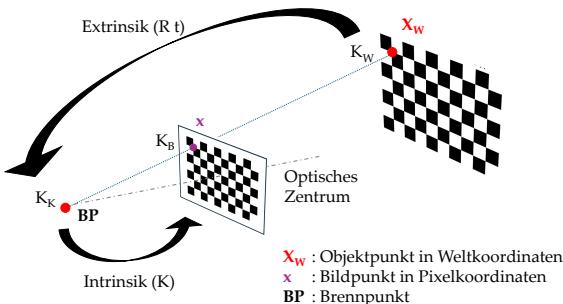


Abbildung 3.4: Vereinfachte Darstellung des Lochkameramodells

3.4 ERMITTLUNG DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

Beginnend mit der Bestimmung der intrinsischen und extrinsischen Parameter der verwendeten Industriekamera erfolgt eine mathematische Beschreibung der Projektionsfläche. Basierend auf der kalibrierten Kamera und der bekannten Pose relativ zur Projektionsebene ist eine Beschreibung der Koordinaten der charakteristischen Merkmale möglich. Ausgehend von den ermittelten Koordinaten der projizierten Punkte ist anschließend eine Bestimmung des Scheinwerferbrennpunkts realisierbar. Durch die Kenntnis über die Lage des Brennpunkts kann unter Verwendung von Winkelbeziehungen der Abstrahlcharakteristik die Fehlstellung des Scheinwerfers berechnet werden. Der Ablauf ist in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt und wird im Folgenden detailliert erläutert.

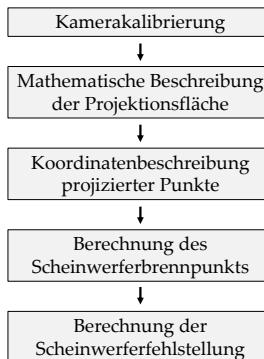


Abbildung 3.5: Schematischer Ablauf zur Ermittlung der Scheinwerferfehlstellung

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

3.4.1 ERMITTlung DER KAMERAINTRINSIK UND -EXTRINSIK

Grundsätzlich erfährt die FAS-Kamera einen mehrstufigen Kalibrierprozess. Zunächst erfolgt die Bestimmung der intrinsischen Parameter (ohne Windschutzscheibe) durch den Zulieferer. Anschließend erfolgt nach Einbau der Kamera in das Fahrzeug die Ermittlung der extrinsischen Parameter, sodass die Lage und Pose der Kamera relativ zum Fahrzeugkoordinatensystem K_{Fzg} bekannt sind. Zusätzlich verfügt die Kamera über eine Online-Kalibrierung, um Korrekturparameter für die Lageänderung der Kamera zu ermitteln. [10] Prinzipiell liegt somit eine kalibrierte Kamera vor, da jedoch im Rahmen der Untersuchungen die Umsetzung mittels der in 3.2.2 beschriebenen Industriekamera erfolgt, ist eine Kalibrierung dergleichen unerlässlich.

Die Industriekamera wird mit Hilfe eines Saugfußes an die Windschutzscheibe auf Höhe der FAS-Kamera befestigt. Die Bestimmung der intrinsischen Parameter erfolgt dabei durch den in MATLAB implementierten Zhang-Algorithmus, welcher Aufnahmen aus verschiedenen Posen erfordert. Für eine präzise Kalibrierung der Kamera werden dazu zahlreiche Bilder des planaren Kalibriermusters bekannter Maße aus verschiedenen Posen erfasst. Aus den Aufnahmen können charakteristische Merkmale extrahiert werden, im vorliegenden Fall die Eckpunkte der einzelnen Schachbrettkacheln. Anschließend wird für jede Aufnahme die Homographie H ermittelt. Sie beschreibt die Projektion von 3D-Weltpunkten einer planaren Fläche in Bildkoordinaten:

$$s \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{K \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t \end{pmatrix}}_H \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$H = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Da der Ursprung des Weltkoordinatensystems auf der planaren Oberfläche liegt, entfällt die z-Komponente. Für die Herleitung der intrinsischen Parameter können die Eigenschaften der Homographie und die Orthogonalität der Rotationsmatrix genutzt werden, woraus folgende Bedingungen resultieren:

$$r_1^T r_2 = 0 \Rightarrow h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0, \quad (3.3)$$

$$\|r_1\| = \|r_2\| \Rightarrow h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2. \quad (3.4)$$

Durch die Aufnahme mehrerer Bilder entsteht ein überbestimmtes Gleichungssystem, wodurch ein Initialwert für die Intrinsik K und die extrinsischen Parameter R_K, T_K je Pose ermittelt werden. Anschließend erfolgt eine nichtlineare Optimierung hinsichtlich des Rückprojektionsfehlers. Für die detaillierte Ausformulierung aller Lösungsschritte sei auf [35] verwiesen.

Ausgehend von der kalibrierten Kamera kann anschließend das Kalibrierobjekt an die Projektionsfläche befestigt werden und die Extrinsik der Kamera relativ zur Projektionsfläche ermittelt werden. Somit ist die geometrische Beziehung zwischen Projektionsfläche und Industriekamera bekannt. Die Kalibrierung der Industriekamera mittels

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

MATLAB erreicht einen mittleren Reprojektionsfehler von 0,24 Pixel und liefert neben den Abbildungsparametern der Kamera auch Verzeichnungsparameter, welche durch die Linse hervorgerufen werden.

3.4.2 MATHEMATISCHE BESCHREIBUNG DER PROJEKTIONSFÄLCE

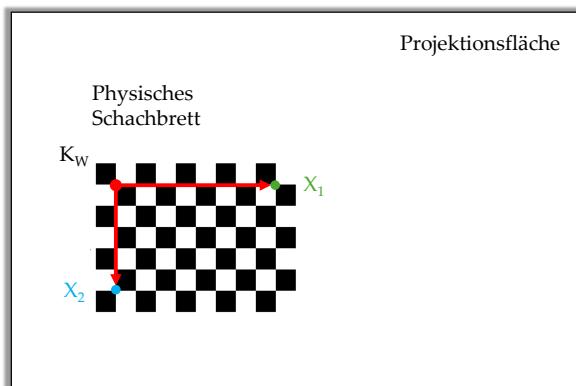


Abbildung 3.6: Darstellung der Projektionsfläche mit zwei Weltpunkten

Da das Kalibriermuster an der Projektionsfläche befestigt ist, lässt sich die Projektionsfläche anhand einer Ebenengleichung definieren. Grundsätzlich lässt sich eine Ebene durch drei koplanare Punkte in der allgemeinen Koordinatenform (3.5) oder in der Normalenform durch einen Punkt auf der Ebene sowie dessen Normalenvektor beschreiben.

Für die Bestimmung der Ebenengleichungen werden zwei linear unabhängige Richtungsvektoren v_1, v_2 aus den bekannten Weltpunkten X_W^1, X_W^2 definiert. Diese erfahren eine Transformation in das Kamerakoordinatensystem unter Verwendung der zuvor ermittelten Extrinsik R, t . Durch das Kreuzprodukt der Richtungsvektoren lässt sich der Normalenvektor der Ebene bestimmen. Aus dem Normalenvektor und einem beliebigen Punkt auf der Ebene kann der Abstand der Ebene vom Ursprung entlang des Richtungsvektors ermittelt werden. Somit liegt die Ebenengleichung im Koordinatensystem der Kamera vor (3.11). Alle projizierten Punkte befinden sich ebenfalls auf der Fläche und können mit Hilfe der Kamera lokalisiert werden.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (3.5)$$

$$\vec{v}_1 = X_K^1 \quad (3.6)$$

$$\vec{v}_2 = X_K^2 \quad (3.7)$$

$$\vec{n} = \vec{v}_1 \times \vec{v}_2 \quad (3.8)$$

$$\vec{n} = \frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|} \quad (3.9)$$

$$d = -\vec{n} \cdot X_K^1 \quad (3.10)$$

$$n_1 X_K + n_2 Y_K + n_3 Z_K + d = 0 \quad (3.11)$$

3.4.3 KOORDINATENBESCHREIBUNG DER CHARAKTERISTISCHEN MERKMALE

Für die Ermittlung der Scheinwerferfehlstellung ist es zunächst erforderlich, die 3D-Koordinaten der projizierten Merkmale aus Sicht der Kamera zu lokalisieren. Das physische Schachbrett ist im Raum

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

vollständig beschreibbar, da das Weltkoordinatensystem entsprechend definiert ist und die Maße des Schachbretts bekannt sind. Für andere Merkmale, wie z.B. Strukturlichtverteilungen auf der Ebene, sind die Maße und somit die absoluten 3D-Koordinaten jedoch nicht bekannt. Diese können unter Verwendung der Ebenengleichung der Projektionsfläche ermittelt werden. Die Prozesskette sieht dabei wie folgt aus:

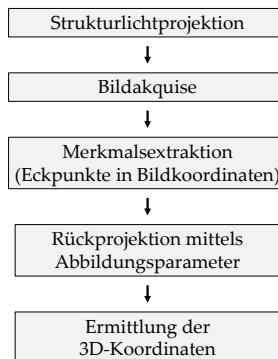


Abbildung 3.7: Ablauf zur Ermittlung der 3D-Koordinaten aus 2D-Bildkoordinaten

Das Fahrzeug, welches orthogonal zur Projektionsfläche ausgerichtet ist, erzeugt eine Strukturlichtverteilung, welche von der Kamera erfasst wird. Da Eckpunkte besonders simpel extrahiert werden können, bietet sich die Projektion eines Schachbrettmusters an. Der Bildverarbeitungsalgorithmus erkennt die Eckpunkte des projizierten Schachbretts und liefert die Pixel-Koordinaten der erkannten Punkte. Durch die bereits kalibrierte Kamera und die dadurch vorhandenen Abbildungsparameter können die 2D-Bildpunkte in Form von Strahlengleichungen im Raum beschrieben werden.

Die Abbildung eines 3D-Punktes in Kamerakoordinaten auf 2D-Pixelkoordinaten erfolgt durch Anwendung der Kameramatrix K . Für die Rückprojektion wird die inverse Kameramatrix verwendet, sodass aus den bekannten Pixelkoordinaten die 3D-Koordinaten im Kamerakoordinatensystem resultieren. Zu beachten ist, dass beim Abbildungsvorgang von Kamera- zu Bildkoordinatensystem die Z-Komponente verloren geht, weshalb die Rückprojektion nur bis auf einen Skalierungsfaktor s eindeutig bestimmbar ist.

$$\begin{pmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \end{pmatrix} = (K^{-1}) \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \frac{X_K}{Z_K} \\ \frac{Y_K}{Z_K} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Dies lässt sich gleichzeitig als der Richtungsvektor, der das erkannte charakteristische Merkmal beschreibt, definieren. Für die Bestimmung der 3D-Koordinaten des Punktes auf der Projektionsfläche kann der Schnittpunkt zwischen der Halbgeraden aus dem Richtungsvektor und der zuvor definierten Ebene ermittelt werden. Unter Verwendung von 3.11 und 3.12 ergibt sich somit:

$$n_1 \cdot (s \cdot \frac{X_K}{Z_K}) + n_2 \cdot (s \cdot \frac{Y_K}{Z_K}) + n_3 \cdot s + d = 0 \quad (3.13)$$

$$s \cdot (n_1 \cdot \frac{X_K}{Z_K} + n_2 \cdot \frac{Y_K}{Z_K} + n_3) = -d \quad (3.14)$$

$$s = -\frac{d}{(n_1 \cdot \frac{X_K}{Z_K} + n_2 \cdot \frac{Y_K}{Z_K} + n_3)} \quad (3.15)$$

Der Schnittpunkt ergibt sich durch das Einsetzen der ermittelten Entfernung s in die Gleichung 3.12.

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

3.4.4 ERMITTlung DES SCHEINWERFERBRENNPUNKTS

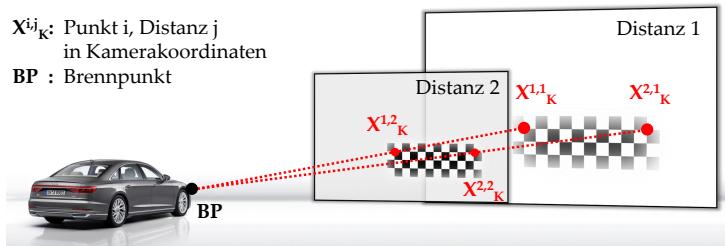


Abbildung 3.8: Brennpunktermittlung auf Basis linear verlaufender Strahlen

Die Ermittlung des Scheinwerferbrennpunkts basiert auf der Annahme, dass alle Strahlen im Raum linear propagieren. Zudem besteht die Eigenschaft, dass alle Strahlen im Brennpunkt zusammentreffen. Aufgrund dieser Kriterien lässt sich der Brennpunkt durch die Schnittpunktbestimmung aller Strahlen mathematisch ermitteln. Für die Definition einer Strahlengleichung bedarf es mindestens zweier Stützpunkte. Durch die Annahme, dass die Strahlen linear verlaufen, können für eine Strukturlichtverteilung Aufnahmen aus mindestens zwei verschiedenen Distanzen akquiriert werden, wodurch ausreichend Stützpunkte für die Definition der Strahlengleichungen vorliegen. Durch die bekannte Ebenengleichung sowie die Beschreibung der Weltpunkte in Kamerakoordinaten ist die Bestimmung der Strahlengleichungen möglich.

Im Allgemeinen lässt sich eine Geradengleichung durch einen Aufpunkt \vec{a}_i und seinen Richtungsvektor \vec{d}_i wie folgt definieren:

$$\vec{p}_i = \underbrace{\vec{a}_i}_{X^{i,1}} + \underbrace{\lambda_i}_{\text{Skalar}} \cdot \underbrace{\vec{d}_i}_{X^{i,2} - X^{i,1}} \quad (3.16)$$

Auf diese Weise lässt sich für alle erkannten Merkmale $X_K^{i,j}$ mit Hilfe von zwei Distanzen je eine Geradengleichung \vec{p}_i definieren. Durch die Verwendung von mehr als zwei Distanzen kann die Anzahl der Geraden erhöht und somit eine robustere Schätzung des Brennpunkts erfolgen. Die Berechnung des Schnittpunkts aller Geraden lässt sich mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate (Least-Squares) realisieren. Der Brennpunkt wird ermittelt, indem der Abstand zu allen Geraden minimiert wird.

Der Abstand $d(\vec{BP}, p_i)$ zwischen dem gesuchten Brennpunkt \vec{BP} und der Geraden p_i , welche durch den Punkt \vec{a}_i und den Richtungsvektor \vec{d}_i verläuft, ist definiert durch:

$$d(\vec{BP}, p_i) = \frac{\|\vec{d}_i \times (\vec{BP} - \vec{a}_i)\|}{\|\vec{d}_i\|} \quad (3.17)$$

Die Anwendung der Least-Squares-Methode minimiert die Summe der quadrierten Abstände zu allen Geraden, woraus der Brennpunkt \vec{BP} resultiert:

$$\min_{\vec{BP}} \sum_i \left(\frac{\|\vec{d}_i \times (\vec{BP} - \vec{a}_i)\|}{\|\vec{d}_i\|} \right)^2 \quad (3.18)$$

Im praktischen Anwendungsfall können verrauschte Daten vorliegen, wodurch eine Koplanarität von mehr als zwei Messpunkten, welche einen Strahl bilden, nicht gewährleistet ist. Folglich können robustere Methoden, wie z.B. die Hauptkomponentenanalyse (PCA), in Betracht gezogen werden, um die Geradengleichungen zu bestimmen. Für

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

eine detaillierte mathematische Beschreibung sei hierfür auf [100] verwiesen.

3.4.5 BERECHNUNG DER FEHLSTELLUNG DES SCHEINWERFERS

Die Berechnung der Fehlstellung des Scheinwerfers basiert auf dem Ansatz eines Soll-Ist-Vergleichs. Im Rahmen der Produktion erfolgt die Korrektur der Scheinwerferpose. Unter der Annahme, dass der Scheinwerfer korrekt eingestellt ist, erfolgt die Brennpunktermittlung nach zuvor beschriebenem Verlauf. Zusätzlich wird eine Referenzaufnahme der Strukturlichtverteilung in einem bekannten Abstand benötigt. Anschließend kann die Ermittlung zukünftiger Fehlstellung durchgeführt werden. Wichtig hierbei ist eine orthogonale Ausrichtung des Fahrzeugs vor der Projektionsfläche. Mit Hilfe eines Referenzobjekts auf der Projektionsfläche kann die Lage der Kamera zur Fläche ermittelt werden. Dies erfolgt durch die kalibrierte Kamera. Ein Algorithmus ermittelt die 3D-Koordinaten der projizierten Merkmale und kann basierend auf den Koordinaten der Soll-Aufnahme die Abweichung in horizontaler und vertikaler Richtung ermitteln (vgl. Abbildung 3.9).

Gesucht ist also der Winkel zwischen dem Soll-Punkt $X_{K,Soll}^1$ und Ist-Punkt $X_{K,Ist}^1$ ausgehend vom ermittelten Brennpunkt BP . Für die Fehlstellung ist viel mehr die Abweichung des Ist-Zustandes in horizontaler $\Delta\phi$ und vertikaler Richtung $\Delta\theta$ von Bedeutung. Ausgehend vom Brennpunkt lassen sich zwei Vektoren \vec{v}_{Soll} , \vec{v}_{Ist} definieren:

$$\vec{v}_{Soll} = \vec{X}_{K,Soll}^1 - \vec{BP} \quad (3.19)$$

$$\vec{v}_{Ist} = \vec{X}_{K,Ist}^1 - \vec{BP} \quad (3.20)$$

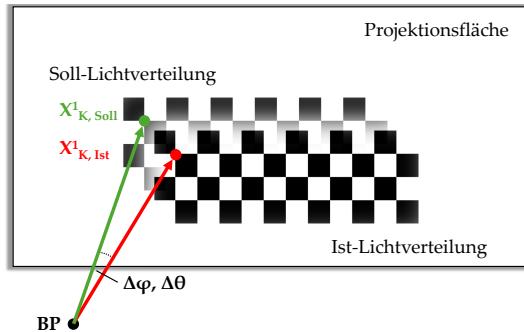


Abbildung 3.9: Fehlstellungsermittlung durch einen Soll-Ist-Vergleich beispielhaft an einem Messpunkt dargestellt

Für die Berechnung des Winkels in horizontaler und vertikaler Richtung erfolgt eine Projektion der Vektoren auf die xz-Ebene bzw. yz-Ebene. Anschließend ergibt sich für die horizontale und vertikale Fehlstellung:

$$\Delta\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{v}_{\text{Soll},xz} \cdot \vec{v}_{\text{Ist},xz}}{\|\vec{v}_{\text{Soll},xz}\| \cdot \|\vec{v}_{\text{Ist},xz}\|} \right) \quad (3.21)$$

$$\Delta\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{v}_{\text{Soll},yz} \cdot \vec{v}_{\text{Ist},yz}}{\|\vec{v}_{\text{Soll},yz}\| \cdot \|\vec{v}_{\text{Ist},yz}\|} \right) \quad (3.22)$$

Je nach Anwendungsfall ist zu beachten, alle Koordinaten zunächst in das Welt- oder Fahrzeugkoordinatensystem zu transformieren, da diese als Referenz für die Beschreibung der Fehlstellungswinkel dienen. Eine bekannte geometrische Beziehung zwischen Fahrzeug- und Kamerakoordinatensystem wird vorausgesetzt.

**PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER
SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG**

3.5 REFERENZMESSUNG MITTELS SCHEINWERFEREINSTELLPRÜFGERÄT

Die Validierung der Genauigkeit des Algorithmus zur Bestimmung der Fehlstellungswinkel erfolgt durch eine Referenzmessung mittels SEP. Das Lichtbild erfährt hierbei eine gezielte, bekannte Verschiebung, welche auf Basis eines SEP vermessen wird. Anschließend erfolgt ein Vergleich zwischen dem vorgegebenen Soll-Wert, welcher mit Hilfe des SEP eingestellt wird, und der durch den Algorithmus gemessenen Fehlstellung. Durch diesen Ansatz ist eine quantitative Bewertung der implementierten Fehlstellungsdetektion möglich.

3.5.1 AUFBAU UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Das Fahrzeug wird in verschiedenen Distanzen orthogonal vor die Projektionsfläche positioniert. Die Orthogonalität des Fahrzeugs wird dabei mit Hilfe eines Laser-Entfernungsmessgeräts sichergestellt. Dazu werden Platten an die Radnaben der Vorderachse befestigt und das Fahrzeug so positioniert, dass der Abstand von der Projektionsfläche zu beiden Platten idealerweise den gleichen Wert erreicht. Anschließend erfolgt die Einstellung verschiedener Fehlstellungswinkel unter Verwendung des SEP. Zuletzt erfasst die Kameraeinheit das aktuelle Lichtbild und berechnet die Fehlstellung auf Basis des implementierten Algorithmus.

Für eine aussagekräftige Bewertung des Algorithmus wird dieser Vorgang für verschiedene Distanzen und Fehlstellungswinkel wiederholt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Fehlstellungsdetektion in drei Distanzen zu acht Fehlstellungen validiert. Abbildung 3.10 stellt

REFERENZMESSUNG MITTELS SCHEINWERFEREINSTELLPRÜFGERÄT

die Versuchsdurchführung für eine Distanz in der Referenzpose von $\Delta\phi, \Delta\theta = 0^\circ$ exemplarisch dar.

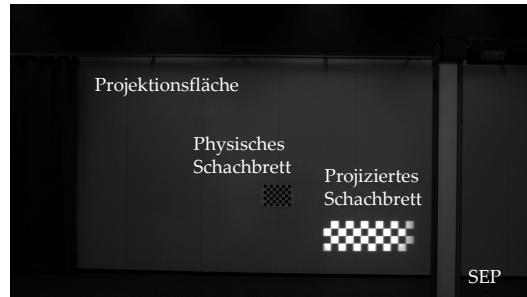


Abbildung 3.10: Versuchsaufbau für die Referenzmessung mittels SEP

Für die Fehlstellungswinkel wurden dabei alle Kombinationen einer Verstellung um $\pm 1^\circ$ in horizontaler und vertikaler Richtung gewählt (vgl. Abbildung 3.11).

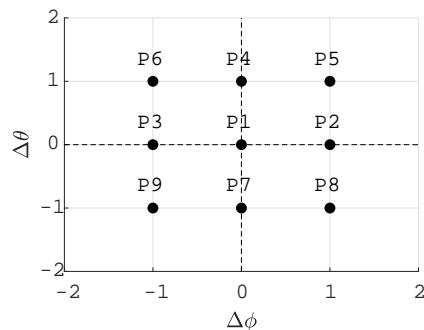


Abbildung 3.11: Messpositionen zur Validierung des Algorithmus

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

Die gezielte Justage des Scheinwerfers in die genannten Positionen erfolgt manuell über Einstellschrauben unter Verwendung des SEP. Die Einstellung der Soll-Position erfolgt anhand eines Referenzbildes für das SEP, welches in der Regel bei der herkömmlichen Kalibrierung verwendet wird. Anschließend erzeugt das Projektionsmodul die Referenzstrukturlichtverteilung wie in Abbildung 3.10 dargestellt. Die 3D-Koordinaten der einzelnen Eckpunkte werden dabei akquiriert und als Referenz für alle weiteren Messpositionen der vorliegenden Distanz gesichert. Letztlich erfolgt die gezielte Verschiebung und die Ausführung des Kalibrieralgorithmus. Das hier verwendete Referenzmuster bietet 33 erkennbare Eckpunkte, welche bei einer Verschiebung des Lichtbilds jeweils die gleiche Fehlstellung erfahren sollten. Für alle erkannten Eckpunkte erfolgt die Fehlstellungsdetektion. Die Mittelung über alle Punkte resultiert in der Fehlstellung des gesamten Moduls. Die Punkte sind oben, links beginnend fortlaufend über die Zeilen und Spalten nummeriert, d.h. Punkt 1 entspricht dem obersten linken Punkt und Punkt 3 dem untersten linken Punkt.

3.5.2 ERGEBNISSE

Für die Untersuchung der Fehlstellungsdetektion existiert je Distanz eine Referenzaufnahme in der Soll-Position $\Delta\phi = \Delta\theta = 0^\circ$, welche mit Hilfe des SEP eingestellt wurde. Anschließend erfolgt die Verstellung der Strukturlichtverteilung in die definierten Fehlstellungspositionen nach Abbildung 3.11. Die erste Distanz zwischen Fahrzeug und Projektionsfläche beträgt ca. 10,4 m (10,406 m links, 10,426 m rechts), gemessen von der Projektionsfläche zu den an den Radnaben angebrachten Platten. In dieser Distanz ergibt sich die in Abbildung 3.12 dargestellte Lichtverteilung. Zusätzlich beinhaltet die Abbildung exemplarisch die Überlagerung des Lichtbilds mit der Fehlstellung in Position 3.

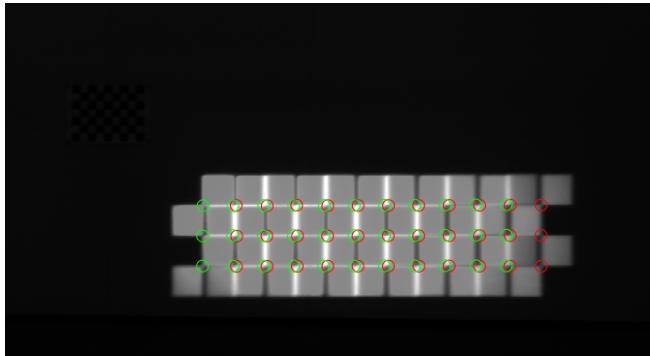


Abbildung 3.12: Überlagerung der Positionen 1 (rot) & 3 (grün) der Strukturlichtverteilung in der ersten Distanz

Die Verschiebung der Lichtverteilung (grün) entspricht laut SEP einer horizontalen Fehlstellung von $\Delta\phi = +1^\circ$. Der Algorithmus liefert für die akquirierten Punkte die in Abbildung 3.13 dargestellten Resultate für das Beispiel aus der ersten Distanz in Fehlstellungswinkel 3. Die Abbildung enthält neben einer Gesamtdarstellung der charakteristischen Punkte mit ihren Fehlstellungswinkeln in Grad jeweils eine Darstellung für die horizontale und vertikale Fehlstellung der spezifischen Punkte. Im Mittel ergibt sich eine detektierte Fehlstellung von $\Delta\phi = 1,03^\circ$ in der Horizontalen und eine Fehlstellung von $\Delta\theta = -0,003^\circ$ in der Vertikalen bei einer Standardabweichung von je $0,01^\circ$. Zusätzlich erfolgt die Darstellung der Ergebnisse für eine signifikante Fehlstellung in vertikaler Richtung (vgl. Abbildung 3.14). Hier beträgt der Mittelwert in horizontaler und vertikaler Richtung $\Delta\phi = -0,007^\circ, \Delta\theta = 1,03^\circ$, respektive, bei einer Standardabweichung von jeweils $0,01^\circ$.

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

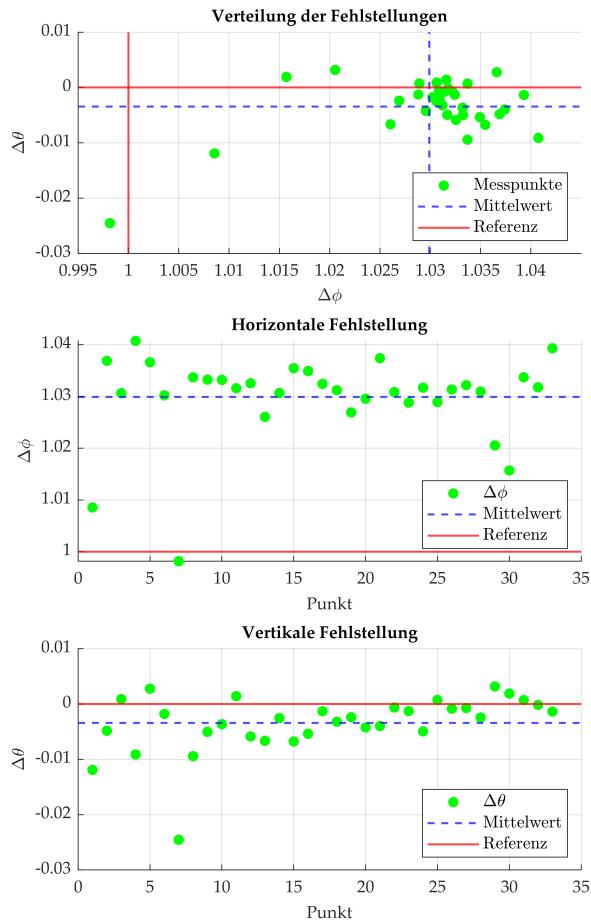


Abbildung 3.13: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 3

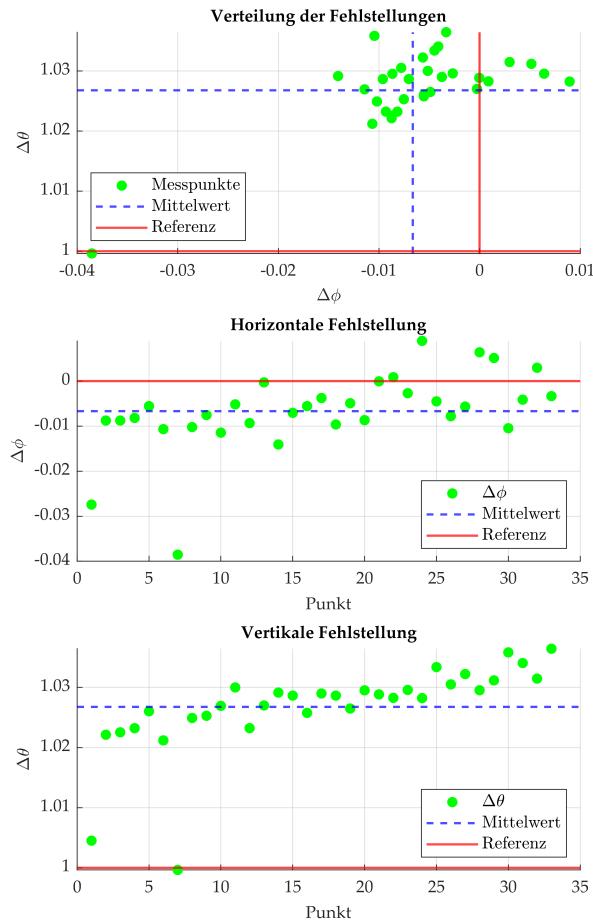


Abbildung 3.14: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 4

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER
SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

Dieser Vorgang wird bei zwei weiteren Distanzen in allen definierten Fehlstellungen wiederholt. Aus Gründen der Übersicht sind hier exemplarisch lediglich zwei Positionen aufgeführt. Für alle Positionen wurden entsprechende Auswertungen erstellt und dem Anhang A.2 beigefügt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse für die erste Distanz ist in Tabelle 3.1 ausgeführt. Die Tabelle beinhaltet zu den acht Messpositionen die zugehörigen Referenzwerte sowie die gemittelten Fehlstellungen μ der 33 erkannten Punkte, je Position mit zugehöriger Standardabweichung σ . Die letzte Spalte beschreibt die tatsächliche Abweichung Δ zwischen dem eingestellten Soll-Wert und dem durch den Algorithmus ermittelten Wert.

Tabelle 3.1: Auswertung der Fehlstellungsdetektion für Distanz 1

Pos.	Ref. $\Delta\phi, \Delta\theta$ [°]	$\mu(\Delta\phi, \Delta\theta)$ [°]	$\sigma(\Delta\phi, \Delta\theta)$ [°]	$\Delta(\text{Ref}, \mu)$ [°]
2	-1, 0	-1.04, 0.06	0.007, 0.004	-0.04, 0.06
3	1, 0	1.03, 0	0.008, 0.005	0.03, 0
4	0, 1	-0.01, 1.03	0.009, 0.007	-0.01, 0.03
5	-1, 1	-1.06, 1.12	0.008, 0.006	-0.06, 0.12
6	1, 1	1.00, 1.09	0.008, 0.006	0, 0.09
7	0, -1	-0.02, -1.04	0.006, 0.005	-0.02, -0.04
8	-1, -1	-1.01, -0.99	0.008, 0.005	-0.01, 0.01
9	1, -1	1.05, -1.05	0.007, 0.005	0.05, -0.05

Aus der Tabelle geht hervor, dass mit Ausnahme der Position 5 eine Abweichung zum Referenzwert von $\Delta \leq |0,1^\circ|$ vorliegt. Eine genaue Beobachtung der erfassten Bilder (siehe A.1) verdeutlicht die mögliche Ursache für die signifikante Abweichung bei Position 5 & 6 und lässt eine ungenaue Einstellung der Soll-Position vermuten.

Zur Bestätigung der ermittelten Genauigkeit erfolgt eine Auswertung in einer weiteren Distanz. Bei vorliegender Messung wurde das Fahrzeug in einem Abstand von etwa 8,5 m (8,463 m links, 8,482 m rechts) positioniert.

Tabelle 3.2: Auswertung der Fehlstellungsdetektion für Distanz 2

Pos.	Ref. $\Delta\phi, \Delta\theta [^\circ]$	$\mu(\Delta\phi, \Delta\theta) [^\circ]$	$\sigma(\Delta\phi, \Delta\theta) [^\circ]$	$\Delta(\text{Ref}, \mu) [^\circ]$
2	-1, 0	-1, 0.05	0.012, 0.004	0, 0.05
3	1, 0	0.99, 0	0.006, 0.003	-0.01, 0
4	0, 1	-0.03, 1.08	0.009, 0.003	-0.03, 0.08
5	-1, 1	-1.01, 1.13	0.014, 0.003	-0.01, 0.13
6	1, 1	0.96, 1.08	0.009, 0.005	-0.04, 0.08
7	0, -1	0.02, -1	0.006, 0.003	0.02, 0
8	-1, -1	-0.98, -0.97	0.011, 0.004	0.02, 0.03
9	1, -1	1.02, -1.03	0.008, 0.003	0.02, -0.01

Die Messungen für die zweite Distanz bestätigen mit Ausnahme von Position 5 eine erreichbare Genauigkeit von $\Delta \leq |0,1^\circ|$. Die horizontale Einstellgenauigkeit liegt bei $\Delta\phi \leq |0,04^\circ|$ während in der Vertikalen (mit Ausnahme von Position 5) eine Genauigkeit von $\Delta\theta \leq |0,08^\circ|$ bestätigt.

Eine letzte Messreihe in einer Distanz von etwa 7,6 m (7,597 m links, 7,620 m rechts) stützt die zuvor erreichten Genauigkeiten. Die Ergebnisse der letzten untersuchten Distanz sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Hierbei wird in der horizontalen Fehlstellung eine maximale Abweichung zum Soll-Wert von $\Delta\phi \leq |0,05^\circ|$ und in der Vertikalen von $\Delta\theta \leq |0,08^\circ|$ festgestellt. Somit erreicht der Algorithmus die geforderte Genauigkeit von $\Delta\phi, \Delta\theta \leq |0,1^\circ|$. Alle Auswertungen

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER
SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

der jeweiligen Distanzen und Positionen sind in Anhang A.2 zu finden.

Tabelle 3.3: Auswertung der Fehlstellungsdetektion für Distanz 3

Pos.	Ref. $\Delta\phi, \Delta\theta$ [°]	$\mu(\Delta\phi, \Delta\theta)$ [°]	$\sigma(\Delta\phi, \Delta\theta)$ [°]	$\Delta(\text{Ref}, \mu)$ [°]
2	-1, 0	-1, 0.05	0.013, 0.005	0, 0.05
3	1, 0	1, -0.05	0.009, 0.004	0, -0.05
4	0, 1	-0.04, 1.04	0.007, 0.003	-0.04, 0.04
5	-1, 1	-1.03, 1.08	0.014, 0.004	-0.03, 0.08
6	1, 1	0.96, 1.04	0.008, 0.004	-0.04, 0.04
7	0, -1	0.01, -0.98	0.007, 0.003	0.01, 0.02
8	-1, -1	-1, -0.94	0.009, 0.006	0, 0.06
9	1, -1	1.05, -0.99	0.008, 0.003	0.05, 0.01

Zusammenfassend erreicht der Algorithmus die maximal zulässige Abweichung in horizontaler und vertikaler Richtung. Zudem entfällt die Verwendung zusätzlicher Hardware durch den Einsatz der bereits im Fahrzeug integrierten Komponenten.

3.6 ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Die umgesetzte Fehlstellungsdetektion wurde basierend auf den Ansätzen von Totzauer [10], Söhner[11] und Schneider [12] realisiert. Alle Ansätze verfolgen dabei das Ziel, die Scheinwerferfehlstellung mit Hilfe einer Scheinwerfer-Kamera-Kopplung zu ermitteln. Projektive Abbildungen fungieren als charakteristische Merkmale, welche

Informationen über die Pose und Orientierung der Scheinwerfer liefern. Die Detektion der Merkmale und die Ermittlung der Fehlstellung erfolgt durch Bildverarbeitungsalgorithmen. Während Söhner Charakteristika aus der Serienlichtverteilung verwendet, nutzen Totzauer und Schneider generierte Strukturlichtverteilungen, unter anderem durch ein zusätzliches Modul. Die Ansätze sind dabei für segmentfreie bis grobaufgelöste, segmentierte Scheinwerfer realisiert.

Das vorliegende Konzept beschreibt die Untersuchung für ein hochaufgelöstes Projektionsmodul unter Verwendung strukturierter Projektionen. Die Ermittlung der Pose basiert dabei auf dem Ansatz der Brennpunktbestimmung nach Schneider. Die mechanische Kopplung zwischen Projektionsmodul und Abblendlichtmodul bedingt die Einstellung der Lichtverteilung für das gekoppelte Gesamtsystem. Im vorliegenden System generiert das Projektionsmodul die Charakteristik der Abblendlichtverteilung, weshalb die Messung über die projizierte Abbildung erfolgt.

Der Ansatz der Brennpunktermittlung erfordert die Aufnahme der charakteristischen Merkmale in mindestens zwei Distanzen bei Beibehaltung der relativen Ausrichtung zwischen Fahrzeug und Projektionsfläche. Zudem werden linear propagierende Strahlenverläufe angenommen, welche sich in einem Brennpunkt schneiden. Den projizierten Merkmalen müssen eindeutige Weltkoordinaten auf der Projektionsebene zugeordnet werden, was durch ein definiertes Koordinatensystem auf der Ebene (angebrachtes Schachbrettmuster) gewährleistet ist. Folglich ist für die Brennpunktermittlung ein Grundkonstrukt unter definierten Bedingungen erforderlich. Für die Anwendung in der Produktionslinie sind somit notwendige Änderungen vorzunehmen. Mit Hilfe der Kameraeinheit kann die Brennpunktermittlung relativ zur Projektionsfläche und zum Kamerakoordinaten-

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

system erfolgen. Ausgehend von einer initial korrekt eingestellten Lichtverteilung kann im weiteren Verlauf die Fehlstellungsdetektion stattfinden.

Die Fehlstellungsdetektion beschreibt die Anwendung in einer Werkstatt oder beim Kundendienst, basierend auf einer zuvor initial durchgeführten Kalibrierung, welche zudem die Bereitstellung einer Soll-Lichtverteilung mit Referenzpunkten/-koordinaten beinhaltet. Zudem ist eine orthogonale Ausrichtung des Fahrzeugs vor der Projektionsfläche entsprechend der Referenzaufnahme essentiell. Eine Verdrehung des Fahrzeugs bzw. der Projektionsfläche resultiert in einer verzerrten Darstellung der Strukturlichtverteilung und somit in einer fehlerhaften Ermittlung der Fehlstellung der Scheinwerfer. Somit ist die Anwendbarkeit im Stillstand durch die geforderte Ausrichtung beschränkt.

Die umgesetzte Fehlstellungsdetektion erreicht die geforderte Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ$, bis auf zwei Fehlstellungspositionen. Bei genauer Betrachtung lässt sich feststellen, dass die Ungenauigkeiten in zwei Distanzen bei der gleichen Fehlstellungsposition auftreten (Distanz 1,2 Position 5). Die genaue Ursache für das Auftreten konnte nicht ermittelt werden. Die Einstellung der Lichtverteilung in die Messposition unterliegt personellen Einstelltoleranzen, welche als Ursache vermutet werden. Das Projektionsmodul, welches an das Abblendlichtmodul gekoppelt ist, erfährt in der Anbauposition ein Gieren nach innen und eine Neigung nach unten. Beim Verfahren von Messposition 4 zu Messposition 5 erfolgte die Rotation möglicherweise lediglich um die y-Achse des Scheinwerfers (vgl. Abbildung 3.3) ohne Korrektur des Nickwinkels. Die Abweichung des Ist-Werts zum Soll-Wert zeigt sich über alle Distanzen verstärkt im Nickwinkel, weshalb für die Weiterentwicklung eine zusätzliche Analyse empfohlen wird.

Die Untersuchung und Umsetzung erfolgte beispielhaft an einem Projektionsmodul und kann analog auf das zweite symmetrische Projektionsmodul übertragen werden. Zudem erfolgte die Umsetzung unter Verwendung einer Industriekamera, welche bei der Integration in die Serienarchitektur durch die FAS-Kamera ersetzt werden kann.

Für den Einsatz im Fahrbetrieb kann das Verfahren angepasst werden, indem die Fahrbahn vor dem Fahrzeug als Projektionsfläche fungiert. Hierfür ist ebenso ein Referenzbild der Strukturlichtverteilung im Soll-Zustand notwendig, d.h. zu jeder Initialkalibrierung muss ein zugehöriges Referenzbild vorliegen. Im weiteren Verlauf kann der Algorithmus analog zu einer orthogonalen Projektionsfläche durchgeführt werden. In diesem Fall erfolgt der Soll-Ist-Vergleich zwischen der Soll- und Ist-Bodenprojektion, die Kenntnis über die geometrische Beziehung zwischen Fahrbahn und Kameraeinheit vorausgesetzt. Zudem muss die Annahme getroffen werden, dass die Projektionsfläche über den Projektionsbereich keine Unebenheiten vorweist, gemäß des Ansatzes von Totzauer.

Für den Einsatz im Kundenbetrieb im öffentlichen Verkehr kann die Annahme nur für spezifische Situationen erfolgen, wie beispielsweise bei Fahrten auf Autobahnen oder Bundesstraßen. Die projizierte Lichtverteilung erfährt durch dynamische Einflüsse, wie die Fahrzeuggbewegung oder Umwelteinflüsse, eine Veränderung in ihrer optischen Ausprägung. Erfolgt die Betrachtung der Messpunkte jedoch über einen längeren Fahrzeitraum, wie beispielsweise bei konstanter Geschwindigkeit auf ebenen Straßen, so können die dynamischen Einflüsse herausgefiltert werden, sodass bei kontinuierlicher Bildakquise der Bodenprojektion die Ist-Positionen der charakteristischen Merkmale resultieren. Somit wäre die Realisierung der Fehlstellungsdetektion im Kundenbetrieb denkbar. Zwar erfüllt das umgesetzte System

PHOTOGRAMMETRISCHE ERMITTlung DER SCHEINWERFERFEHLSTELLUNG

die definierten Anforderungen aus Kapitel 3.2.3 bis zum aktuellen Bearbeitungsstand, für eine Bestätigung der Anwendbarkeit mittels Bodenprojektionen steht jedoch eine zusätzliche Referenzmessung aus. Zudem werden einige der definierten Anforderungen erst im weiteren Verlauf der Arbeit implementiert und diskutiert.

Die Untersuchungen einer Fehlstellungsdetektion im dynamischen Fahrbetrieb wurden von Totzauer [10] durchgeführt, weshalb im Rahmen dieser Arbeit keine nähere Betrachtung stattfindet. Dennoch soll die Anwendbarkeit der umgesetzten Fehlstellungsdetektion diskutiert werden. Während Totzauer für die Fehlstellungsdetektion lediglich einen Messpunkt im Nahbereich verwendet, ermöglicht das Projektionsmodul eine Vielzahl an charakteristischen Merkmalen über den gesamten Projektionsbereich. Aus theoretischer Sicht kann anhand mehrerer Punkte eine robustere Schätzung der Fehlstellung erfolgen. Liegt bei Verwendung eines einzelnen Messpunkts eine große Toleranz vor, so kann daraus nicht zuverlässig auf die Fehlstellung geschlossen werden. Toleranzbehaftete Messpunkte werden im Ansatz von Totzauer verworfen, während die Nutzung mehrerer Messpunkte die Kompensation der Toleranz ermöglicht.

Zudem ermöglichen Messpunkte in großer Distanz im Vergleich zu Punkten in geringer Distanz aus geometrischer Sicht eine robustere Erkennung der Fehlstellung. Die Fehlstellung bewirkt mit zunehmender Distanz eine zunehmende absolute Verschiebung, wodurch eine genauere Messung der Fehlstellung erfolgen kann.

Für den Einsatz der Fehlstellungsdetektion im öffentlichen Verkehr ist eine ECE-konforme Lichtverteilung notwendig, weshalb der Fokus dieser Arbeit darin liegt, die Merkmale in die Lichtverteilung zu integrieren, sodass sie vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden. Im gleichen Zug erfordert die Anwendung des Algorithmus eine Detektierbarkeit der notwendigen Muster, wodurch ein Zielkonflikt

ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

zwischen menschlicher Wahrnehmung und kamerabasierter Detektion resultiert.

Kapitel 4

METHODEN FÜR NICHT-WAHRNEHMbare PROJEKTIONEN

In folgendem Kapitel erfolgt die Darstellung potentieller Methoden, mit dem Ziel, Projektionen für das menschliche Auge zu verbergen, während sie für eine Kamera dennoch erfassbar bleiben. Die Lösung dieses Zielkonflikts bildet eine zentrale Rolle, insbesondere für die Realisierung einer nicht wahrnehmbaren Fehlstellungsdetektion im öffentlichen Verkehr. Neben der Darstellung der Methoden erfolgt zusätzlich eine Bewertung hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit und Anwendbarkeit.

4.1 VARIATION DER WELLENLÄNGE

Die Variation der Wellenlänge projizierter Muster bietet eine effektive Möglichkeit, eine Wahrnehmung durch das menschliche Auge zu verhindern. Das menschliche Auge ist in der Lage, Licht in einem Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm visuell wahrzunehmen. Frequenzen unterhalb dieses Bereichs (ultraviolette Strahlung) sowie oberhalb des sichtbaren Bereichs (Infrarot-Strahlung)

können durch das menschliche Auge nicht erfasst werden, während spezielle Kamerasysteme die Detektion der Strahlung ermöglichen.

Im Bereich der Fahrerassistenz findet UV-Strahlung jedoch keinen Einsatz. Für IR-Strahlung existieren bereits Komponenten, wie eine Wärmebildkamera, welche die von Objekten abgestrahlte Wärme erfasst und in Schwarz-Weiß-Bilder wandelt. Dadurch können Informationen über die Umgebung vor dem Fahrzeug gewonnen werden. [101] In der Theorie ist somit die Umsetzung der Methode realisierbar, zeigt jedoch Grenzen hinsichtlich der nutzbaren Hardware.

Die Hardware für die Wahrnehmung der Strahlung ist in bestimmten Fahrzeugmodellen zwar gegeben, jedoch existiert kein Modul zur Erzeugung der benötigten Strahlung. Die Begrenzung durch die Fahrzeugausrüstung verhindert somit die Realisierung nicht-wahrnehmbarer Projektionen im IR-Bereich. Das DML-Modul erlaubt lediglich die Emission eines festen Lichtspektrums, weshalb die Variation der Wellenlänge für den geforderten Anwendungsfall keine Eignung zeigt.

4.2 RÄUMLICHE MODULATION DER PROJEKTION

Die Idee, die optische Ausprägung von Projektionen in ihrer Ortsfrequenz zu modulieren, bietet einen vielversprechenden Ansatz, nicht-wahrnehmbare Projektionen darzustellen. Dabei werden die Grenzen des menschlichen Auflösungsvermögens genutzt, welche durch die Kontrastsensitivitätsfunktion dargestellt werden. Durch die Nutzung von hohen Ortsfrequenzen für die Projektionen, welche sich

im Auflösungsbereich der akquirierenden Kameraeinheit befinden, kann eine nicht-wahrnehmbare Darstellung der Projektionen realisiert werden. Eine theoretische Betrachtung der beteiligten Komponenten, Projektionsmodul, Kamera und Auge, liefert folgende Zusammenhänge.

Für das menschliche Auge wird als Richtwert für das räumliche Auflösungsvermögen etwa eine Winkelminute angegeben. Sie ist zum Einen durch die Beugung am abbildenden Linsensystem und zum Anderen durch die räumliche Dichte der aufnehmenden Sehzellen begrenzt. [102] Die Sehzellen, bestehend aus Stäbchen und Zapfen, unterscheiden sich dabei in ihrer Funktionalität und Empfindlichkeit. Stäbchen sind besonders lichtsensitiv und ermöglichen das skotopische Sehen bei nächtlichen Lichtverhältnissen. Weniger empfindlich dagegen reagieren die Zapfen, wodurch sie für das photopische Sehen bei Tageslicht verantwortlich sind. [103] Je nach Adaptationsleuchtdichte spiegelt sich die Aktivität der Sehzellen in der Kontrastsensitivitätskurve wider (vgl. Abbildung 4.1).

Für eine sehr dunkle Umgebungsbeleuchtung zeigt sich eine maximale Empfindlichkeit bei einer Ortsfrequenz von etwa 1 cpd. Mit zunehmender Frequenz sinkt auch die Empfindlichkeit. Für hohe Umgebungsbeleuchtungen, also beim photopischen Sehen, bildet die CSF einen bandpassförmigen Verlauf, wodurch das Auge eine maximale Empfindlichkeit bei etwa 8 cpd erreicht.

Das Projektionsmodul liefert durch die gegebene Chip-Auflösung im entsprechenden Betriebsmodus und dem gegebenen FOV eine theoretische räumliche Auflösung von etwa 41 cpd. Bei dieser Frequenz zeigt die CSF eine deutliche Abnahme der Wahrnehmungsfähigkeit, wodurch der Ansatz für das Verbergen der Projektionen begünstigt wird, sofern die Kamera die Projektionen auflösen kann.

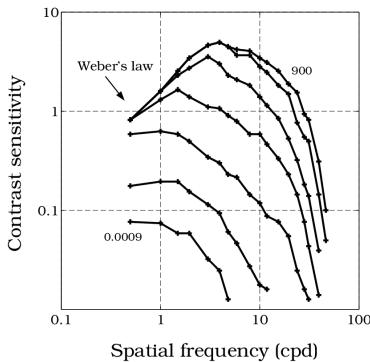


Abbildung 4.1: Verschiebung der Kontrastsensitivitätskurve bei unterschiedlicher Adaptation des Auges ($9 \cdot 10^{-4}$ Troland – $9 \cdot 10^2$ Troland) [104]

Basierend auf der Chip-Auflösung der Kameraeinheit und des Objektiv-FOV geht eine räumliche Auflösung von etwa 33 cpd hervor. Da das Projektionsmodul eine höhere räumliche Frequenz erzeugt, ist die Kamera der limitierende Faktor für das Gesamtsystem. Sie kann nicht alle vom Projektor erzeugten Details auflösen und definiert somit die obere Grenze der nutzbaren Ortsfrequenz der Projektion und somit die theoretisch maximal anwendbare Frequenz der Methodik.

Die alleinige Anpassung der Ortsfrequenz zeigt im gegebenen Systemaufbau für eine nicht-wahrnehmbare Projektionsdarstellung keine Eignung. Während das Projektionssystem in der Theorie eine räumliche Frequenz von 41 cpd ermöglicht, limitiert die Kameraeinheit das Gesamtsystem. Dennoch begünstigt das Verfahren die Darstellung der Projektionen hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit in der gewünschten

Anwendung. Die Kontrastempfindlichkeit des menschlichen Auges nimmt im hohen Frequenzbereich stark ab, besonders unter mesopischen und skotopischen Bedingungen. Da die maximale Empfindlichkeit in einem Bereich von etwa 1 – 8 cpd liegt, könnte eine reduzierte Ortsfrequenz, welche im Erfassungsbereich der Kamera liegt, einen praktikablen Kompromiss liefern. Die tatsächliche Wahrnehmbarkeit erfordert jedoch eine experimentelle Validierung.

4.3 ZEITLICHE MODULATION DER PROJEKTION

Das zeitliche Auflösungsvermögen beschreibt, welcher Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Reizen erforderlich ist, um als separate Reize wahrgenommen zu werden. Für die Anwendung bei nicht-wahrnehmbaren Projektionen ergibt sich somit die Möglichkeit, Muster mit einer Frequenz oberhalb der zeitlichen Auflösungsgrenze (CFF) zu modulieren, sodass ein homogenes Lichtbild für das menschliche Auge erscheint. Das Prinzip soll beispielhaft anhand der Generierung der Abblendlichtverteilung erläutert werden.

Im Normalfall erzeugt das Projektionsmodul die Abblendlichtverteilung durch eine statische Ausgabe der Soll-Lichtverteilung. Die Lichtverteilung kann jedoch auch durch die Überlagerung zweier Einzelbilder generiert werden. Die Summe der Teilbilder ergibt die ursprüngliche Abblendlichtverteilung. Ausgehend von einer Schachbrettpunktmusterprojektion kann das komplementäre Schachbrettmuster zur Erzeugung der ursprünglichen Gesamtlichtverteilung verwendet werden (vgl. Abbildung 4.2). Durch die zeitlich aufeinanderfolgende Darstellung der Teilbilder ergibt sich, bedingt durch die Trägheit des Auges, ein konstant wahrgenommener Reiz, d.h. eine konstante Leuchtdichte

über die Zeit. Durch diese Vorgehensweise lassen sich Muster gezielt verbergen und von einer Kameraeinheit mit ausreichender Bildrate detektieren.

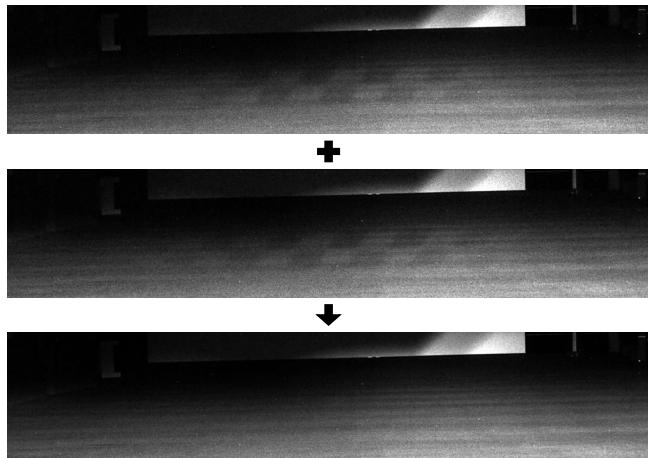


Abbildung 4.2: Schnelle, zeitliche Abfolge zweier komplementärer Projektionen zur Erzeugung der Gesamtlichtverteilung

Wie in Kapitel 2.3.2 dargestellt, beläuft sich die kritische Flimmerfrequenz beim menschlichen Auge unter photopischen Bedingungen auf einen Richtwert von 60 Hz. Dennoch beeinflussen verschiedene Faktoren die CFF, wie beispielsweise die Adaptation des Auges, die Leuchtdichte und Größe des Lichtreizes, der Kontrast sowie die individuelle Wahrnehmung von Menschen, sodass situationsbedingt unterschiedliche Grenzwerte hervorgehen.

Abbildung 4.3 beschreibt den Zusammenhang der kritischen Flimmerfrequenz in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte und der

Modulationstiefe für ein flimmerndes Feld von 55° , welche aus den Untersuchungen von Kelly [55] hervorgeht.

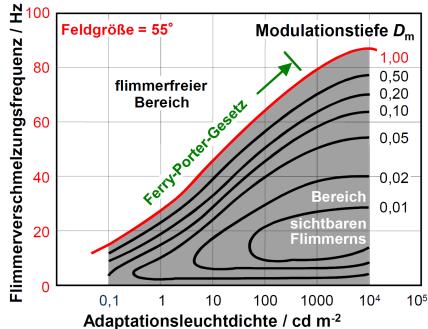


Abbildung 4.3: CFF in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte und der Modulationstiefe, angepasst aus [105]

Ersichtlich ist der lineare Anstieg der CFF bei logarithmisch zunehmender Leuchtdichte, was durch das Ferry-Porter-Gesetz beschrieben wird. Oberhalb der dargestellten Kurven befindet sich der flimmerfreie Bereich, wohingegen unterhalb der Kurven sichtbares Flimmen auftritt. Zudem bewirkt eine zunehmende Modulationstiefe eine steigende kritische Flimmerfrequenz.

Somit ist für die Realisierung nicht-wahrnehmbarer Projektionen bei gleichzeitiger Detektierbarkeit durch eine Kameraeinheit eine zeitliche Frequenz zielführend, welche oberhalb der kritischen Flimmerfrequenz liegt. Zu berücksichtigen ist hierbei die Wahl eines geeigneten Kontrasts, welcher im Erfassungsbereich der Kamera liegt. Anhand des Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) der Kamera kann eine theoretische Berechnung der minimalen, erfassbaren Modulationstiefe erfol-

gen. Das SNR der Kamera beträgt 39,6 dB, welches das Verhältnis zwischen dem Nutzsignal und dem Rauschen beschreibt. Aus dem SNR lässt sich die minimale, detektierbare Modulationstiefe wie folgt ermitteln:

$$\text{SNR} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{Signal}}{\text{Rauschen}} \right) \quad (4.1)$$

$$39,6 = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{Signal}}{\text{Rauschen}} \right) \quad (4.2)$$

$$\frac{39,6}{20} = \log_{10} \left(\frac{\text{Signal}}{\text{Rauschen}} \right) \quad (4.3)$$

$$1,98 = \log_{10} \left(\frac{\text{Signal}}{\text{Rauschen}} \right) \quad (4.4)$$

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Rauschen}} = 10^{1,98} \quad (4.5)$$

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Rauschen}} \approx 95,5 \quad (4.6)$$

$$\text{Minimale Modulationstiefe} = \frac{1}{95,5} \approx 0,01 \quad (4.7)$$

Die Kamera ist gemäß theoretischer Betrachtung in der Lage eine Modulationstiefe von 0,01 zu detektieren.

Analog zu vorherigem Vorgehen erfolgt die theoretische Grenzbetrachtung für die zeitliche Komponente. Aus den technischen Daten der Kamera geht hervor, dass eine Aufnahme bei voller Auflösung mit

einer Framerate bis zu 100 fps (frames per second) erfolgen kann. Das Projektionsmodul liefert eine maximale Ausgabefrequenz von 60 fps. Somit ist theoretisch eine Erfassung der Einzelbilder durch die Kamera oberhalb der CFF möglich. Zu beachten gilt jedoch, dass das Projektionsmodul das Gesamtsystem maßgeblich einschränkt, wodurch eine CFF unter 30 Hz erreicht werden muss. Einen weiteren Faktor stellt die Beleuchtungssituation während der Anwendung des Verfahrens dar. Die Aufnahme eines Bildes erfordert, je nach Blendenöffnung und Umgebungsbeleuchtung, eine gewisse Belichtungszeit, damit das akquirierte Bild ausreichend Informationen über die gegebene Situation enthält. Diese schränkt gleichzeitig die maximale Framerate bei der Szenenaufnahme ein und muss berücksichtigt werden.

Für das gegebene System erfolgt fortlaufend im Rahmen experimenteller Untersuchungen die Validierung zeitlich modulierte Projektionen für eine nicht-wahrnehmbare Darstellung der Projektionen. Dabei soll die Eignung im praktischen Anwendungsfall bewertet werden.

Kapitel 5

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgen statische und dynamische, experimentelle Untersuchungen hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit von Projektion unter kontrollierten Umgebungsbedingungen sowie unter Realbedingungen im Verkehr. Ziel ist es, die Anwendbarkeit zuvor beschriebener Methodik für eine nicht-wahrnehmbare Kalibrierung zu validieren.

5.1 OPTISCHE AUSPRÄGUNG DER PROJEKTIONEN

Die optische Ausprägung von projizierten Merkmalen lässt sich durch verschiedene Charakteristika beschreiben. Dazu zählen neben der geometrischen Form, Größe, Ausrichtung auch die Leuchtdichte bzw. der Kontrast und die Homogenität der Projektion. Für das Verbergen von Merkmalen spielen diese Faktoren eine bedeutende Rolle, weshalb für die Anwendung des Verfahrens und durch die gegebene Hardware ein zielführender Parametersatz ermittelt werden muss. Zielführend meint dabei, die Merkmale in maximalem Maß für das menschliche Auge zu verbergen, während sie gleichzeitig gut erkennbar für die Kamera bleiben.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

5.1.1 BESTIMMUNG DES CHARAKTERISTISCHEN MERKMALS

Digitale Bilder in Form von Graustufenbildern enthalten Informationen über die Intensitätswerte einzelner Pixel. Homogene Flächen zeichnen sich durch gleichverteilte Intensitätswerte aus, wohingegen markante Kanten oder Texturen Intensitätsgradienten aufweisen. Diese Gradienten beschreiben signifikante Übergänge zwischen den Pixeln, welche durch Bildverarbeitung numerisch extrahiert werden können. Für die Erfassung durch die Kamera sind somit Formen geringer Komplexität mit markanten Leuchtdichteunterschieden bei der Gestaltung der projizierten Merkmale essentiell. Solche Formen können beispielsweise punktförmig oder linienartig sein.

Für die Wahrnehmbarkeit durch das menschliche Auge ist die optische Ausprägung von gleicher Bedeutung. Jahn [106] beschreibt hierzu Kriterien für die Blickzuwendungsdauer und damit für die Auffälligkeit von Projektionen. Als wichtige Faktoren sind die Geometrie und die Homogenität der Projektion zu nennen. Ungewöhnliche, komplexe Projektionen erfahren eine größere Zuwendung als solche simpler Form. Die Empfindlichkeit des Auges gegenüber unterschiedlichen Formen ist variabel ausgeprägt und hängt zum einen von der Größe, dem Kontrast sowie der Abbildungsqualität und zum anderen vom Projektionsort des Objekts auf der Netzhaut ab. Auf Kontraständerungen im peripheren Sichtfeld reagiert das Auge deutlich empfindlicher als im zentralen Feld, da dort der Großteil der Stäbchen lokalisiert ist.

Für die Realisierung der Fehlstellungsdetektion gelten gewisse Bedingungen, welche primär zu berücksichtigen sind. Horizontale oder vertikale Linien sind durch Kantendetektoren simpel identifizierbar, für den Anwendungsfall der Fehlstellungsdetektion jedoch nicht vollständig geeignet. Horizontalen Linien beinhalten lediglich die ver-

tikale Fehlstellungsinformation bei fehlender Information über die Horizontale. Analog dazu verhalten sich vertikale Linienprojektionen. Die Kombination beider Orientierungen liefert die Fehlstellung in beiden Richtungen. Die Verwendung punktförmiger Merkmale liefert ebenso die Fehlstellung in beide Orientierungen, da die Abweichung in jeder Richtung erfasst werden kann. Die Erkennung durch die Bildverarbeitung kann beispielsweise durch Thresholding erfolgen. Dabei wird im erfassten Bild nach festgelegten globalen oder lokalen Schwellwerten gefiltert, woraus sich das gesuchte Segment ergibt. [31]

Dennoch wird auf die Nutzung von punktförmigen Projektionen verzichtet, da beispielsweise Umgebungseinflüsse oder Rauschen die Abbildungsqualität reduzieren. Inhomogenitäten in der Lichtverteilung können ebenfalls punktuelle Intensitätsunterschiede bewirken, wodurch eine Unterscheidung erschwert wird. Die Kalibrierung erfolgt unter Verwendung eines Schachbrettmusters, wofür die Bildverarbeitung eine zuverlässigere Detektion der Eckpunkte liefert. Abbildung 5.1 zeigt die Erkennbarkeit der gewählten Musterprojektion aus Sicht der erfassenden Kameraeinheit.



Abbildung 5.1: Schachbrettprojektion in der Abblendlichtverteilung als charakteristisches Muster

Die Schachbrettstruktur ist deutlich erkennbar, jedoch erfährt die Abbildungsqualität der Projektion eine deutliche Beeinträchtigung aufgrund der Fahrbahnbeschaffenheit. In der Aufnahme sind zudem

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

horizontale Linien zu erkennen, welche bei der Verwendung einer horizontalen Projektion zu fehlerhaften Detektionen führen können. Das Schachbrettmuster zeichnet sich durch eine simple Form mit notwendigen Gradienten aus, welche durch die Kamera erfasst werden können. Die Eckpunkte können durch bekannte Bildverarbeitungsalgorithmen extrahiert werden und beinhalten Informationen über die Fehlstellung in beiden geforderten Orientierungen.

5.1.2 ERMITTlung DER MODULATIONSTIEFE

Die Abblendlichtverteilung wird unter anderem durch die Projektionsmodule generiert. Dabei wird je ein Lichtbild mit vorgegebenen Intensitätswerten ausgegeben. Die Bilder enthalten Graustufenwerte für jedes Pixel, wodurch die Intensität für jedes Pixel definiert ist. Die Ausgabe durch die jeweiligen Module kann aus Abbildung 5.2 entnommen werden.

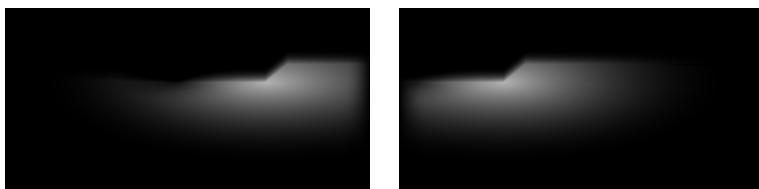


Abbildung 5.2: Generierung der Abblendlichtverteilung mit Hilfe vorgegebener Graustufenbilder für das linke und rechte Projektionsmodul

Die dargestellten Bilder repräsentieren die serienmäßigen Projektionen für die Abblendlichtverteilung. Die zeitliche Modulation darf die visuelle Darstellung der serienmäßigen Projektion nicht beeinflussen, sodass trotz Anwendung der Methode die serienmäßige Ausgabe hervorgeht. Die charakteristischen Merkmale werden in die

Lichtverteilung integriert, sodass durch die zeitliche Modulation im Mittel die ursprüngliche Lichtverteilung hervorgeht. Somit ist gefordert, dass der Mittelwert des Intensitätswerts je Pixel erhalten bleibt.

Anhand der Graustufenwerte der Bilder lässt sich die maximal anwendbare Modulationstiefe ermitteln. Hierzu wird der höchste, vor kommende Graustufenwert ermittelt, welcher sich auf einen Wert von 180 beläuft. Das vorliegende Graustufenbild ermöglicht die Darstellung von 256 Intensitätsstufen, wodurch ein Maximalwert von 255 erreicht werden kann. Ausgehend vom ursprünglichen Wert des Pixels muss die Abweichung der modulierten Pixel zum Ursprungswert betragsmäßig gleich sein, sodass eine symmetrische Modulation vorliegt (vgl. Abbildung 5.3).

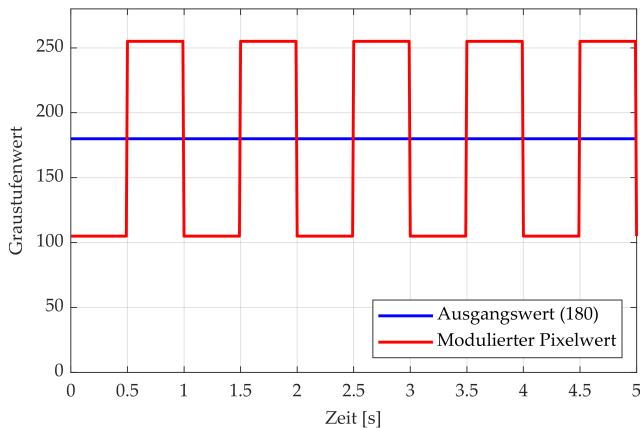


Abbildung 5.3: Beispielhafte Darstellung der zeitlichen Modulation mit maximaler Modulationstiefe für den ursprünglichen Pixelwert

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Im vorliegenden Fall beträgt die Abweichung zum maximalen Graustufenwert 75 Stufen, wodurch sich folgende Modulationstiefe D_m ergibt:

$$D_m = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{255 - (180 - 75)}{255 + (180 - 75)} = 41,67 \% \quad (5.1)$$

Aus Gründen der Vereinfachung wird für den weiteren Verlauf eine Modulationstiefe von 40 % verwendet. Für das menschliche Auge ist ein niedriger Modulationsgrad zielführend, während möglichst hohe Kontraste die Merkmalsdetektion durch die Kamera begünstigen.

5.1.3 BESTIMMUNG DER ZEITLICHEN MODULATIONSFREQUENZ

Die Bestimmung der Modulationsfrequenz erfolgt durch die Betrachtung der beteiligten Komponenten. Für das Auge ist eine Modulationsfrequenz oberhalb der kritischen Flimmerfrequenz zielführend, sodass Teilbilder zu einer kontinuierlichen Wahrnehmung verschmelzen.

Die Kamera kann bei maximaler Auflösung Aufnahmen mit bis zu 100 fps erreichen. Dieser theoretische Wert wird jedoch von weiteren Parametern beeinflusst. Dazu zählen vor allem die Eigenschaften des Objektivs. Die Blendenöffnung bestimmt den Lichteinfall auf den Sensor der Kamera, wodurch je nach Blendengröße eine unterschiedlich lange Belichtungszeit notwendig ist, um ein verwertbares Bild zu erfassen. Welche Belichtungszeit erforderlich ist, ergibt sich durch praktische Untersuchungen unter situationsspezifischen Beleuchtungsverhältnissen. Unter Berücksichtigung der limitierenden Komponente, - dem Projektionsmodul - welches eine maximale Ausgabefrequenz

von 60 fps erreicht, lässt sich eine maximale Belichtungszeit für die Kamera ermitteln (vgl. Abbildung 5.4).

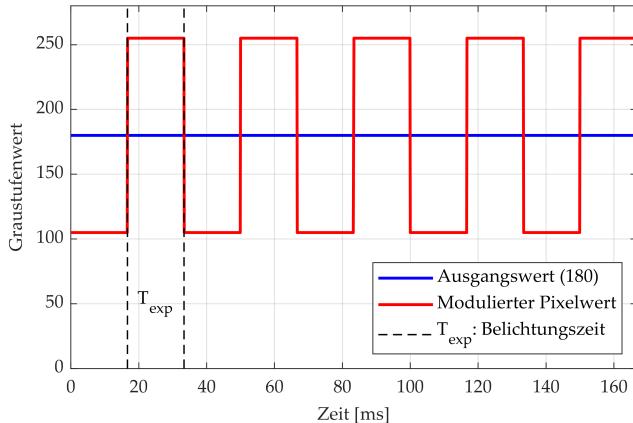


Abbildung 5.4: Maximale Belichtungszeit der Kamera

Zu beachten ist, dass der Projektor 60 Bilder je Sekunde ausgeben kann. Für die Modulation und das entsprechende Signal, bestehend aus beiden komplementären Bildern, ergibt sich dadurch eine maximale Modulationsfrequenz von 30 Hz. Ein Zyklus entspricht dabei der Abfolge zweier komplementärer Projektionen. Die Kamera benötigt lediglich eines der beiden Bilder, um die Merkmale zu erfassen. Damit ergibt sich eine maximale Belichtungszeit von 16,67 ms, eine Synchronisierung zwischen Kamera und Projektionsmodul vorausgesetzt. Da für die zeitliche Modulation eine möglichst hohe Frequenz die Wahrnehmung für das menschliche Auge reduziert, wird die maximal realisierbare zeitliche Frequenz von 30 Hz gewählt.

5.1.4 EINFLUSS DER ORTSFREQUENZ

Wie in Kapitel 4.2 dargelegt, reagiert das Auge mit variabler Empfindlichkeit auf unterschiedliche Ortsfrequenzen. Der Ansatz zeitlich modulierter Projektionen ermöglicht die Maskierung von Projektionen jeglicher Ortsfrequenz, wodurch die Wahl einer spezifischen Ortsfrequenz irrelevant scheint. Da jedoch die maximal nutzbare Ausgabefrequenz der Projektionen auf einen theoretisch wahrnehmbaren Bereich begrenzt ist (≤ 30 Hz), reduziert eine geeignete Wahl der Ortsfrequenz zusätzlich die Wahrnehmbarkeit für das Auge.

Das Projektionsmodul liefert im Betriebsmodus eine Auflösung von 1152×572 Pixel und mit gegebenem FOV von $14^\circ \times 7^\circ$ eine Winkelauflösung von $0,01215 \frac{^\circ}{\text{px}}$ in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Auflösung bestimmt, wie viele Linienpaare (lp) durch das Projektionsmodul generiert werden können. Die maximale Anzahl beläuft sich somit auf 576 lp in horizontaler und 288 lp in vertikaler Richtung. Grundsätzlich lassen sich aufgrund der Diskretisierung nur ganzzahlige Pixelanzahlen pro Linie realisieren, wodurch diskrete Werte für die darstellbaren Ortsfrequenzen resultieren, sofern der gesamte FOV berücksichtigt wird. Theoretisch ergibt sich die Möglichkeit der Darstellung von beliebigen Ortsfrequenzen, wobei ungenutzte Pixel im Randbereich vorliegen. Tabelle 5.1 enthält alle darstellbaren Linienpaare für die horizontale und vertikale Modulation unter Berücksichtigung des gesamten FOV. Unter der Verwendung aller Pixel erfolgt die Darstellung einer konstanten Ortsfrequenz über den gesamten Bereich.

Da für die Lichtverteilung jedoch nicht der gesamte FOV genutzt wird (vgl. Abbildung 5.5), ist die Verwendung der in Tabelle 5.1 aufgeführten diskreten Werte nicht obligatorisch. Zu beachten ist die Darstellung der Ortsfrequenz aus Sicht des Projektionsmoduls.

Tabelle 5.1: Darstellbare Linienpaare (lp) bzw. Ortsfrequenzen (cpd) aufgrund der Diskretisierung in horizontaler und vertikaler Richtung unter Berücksichtigung des gesamten FOV

Horizontal			Vertikal		
lp	px/Linie	cpd	lp	px/Linie	cpd
1	576	0.07	1	288	0.14
2	288	0.14	2	144	0.29
3	192	0.21	3	96	0.43
4	144	0.29	4	72	0.57
6	96	0.43	6	48	0.86
8	72	0.57	8	36	1.14
9	64	0.64	9	32	1.29
12	48	0.86	12	24	1.71
16	36	1.14	16	18	2.29
18	32	1.29	18	16	2.57
24	24	1.71	24	12	3.43
32	18	2.29	32	9	4.57
36	16	2.57	36	8	5.14
48	12	3.43	48	6	6.86
64	9	4.57	72	4	10.29
72	8	5.14	96	3	13.71
96	6	6.86	144	2	20.57
144	4	10.29	288	1	41.14
192	3	11.29			
288	2	20.57			
576	1	41.14			

Die Generierung der Ausgabe erfolgt unter Verwendung eines programmierten MATLAB-Skripts. Die ursprüngliche Lichtverteilung erfährt eine Kontrastmodulation durch ein Schachbrett mit definierten Ortsfrequenzen, woraus zwei Ergebnis-Bilder resultieren.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Abbildung 5.5, stellt das Prinzip beispielhaft dar, für eine Modulationstiefe von 40 % und je einer Ortsfrequenz von 0,57 cpd. Die Pixel, welche mit einer weißen Schachbrettfläche maskiert werden, erfahren eine positive Modulation, wohingegen die dunkle Maskierung eine Reduktion der Graustufenwerte bewirkt. Bei Anwendung der zeitlichen Modulation ergibt sich für das wahrnehmende Auge das ursprüngliche Ausgangsbild, d.h. die Eigenschaften der ursprünglichen Lichtverteilung bleiben hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit erhalten.

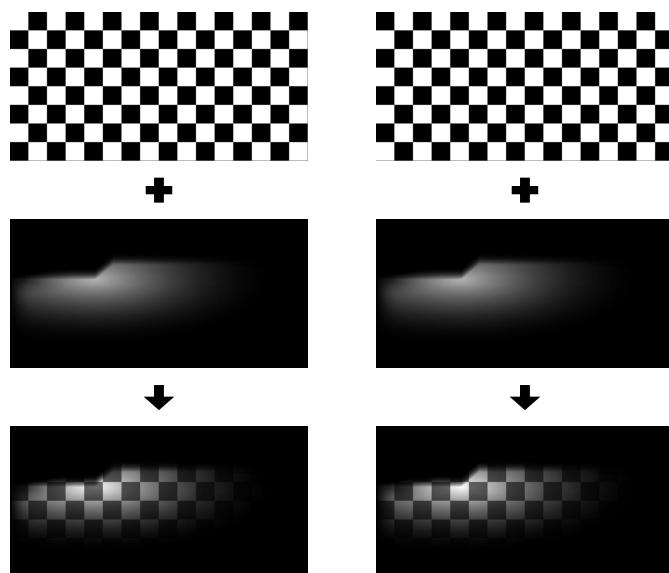


Abbildung 5.5: Generierung der modulierten Einzelbilder durch Überlagerung eines Schachbrettmusters und dessen Komplement mit dem Ausgangsbild bei definierten Ortsfrequenzen (hier beispielhaft 0,57 cpd, 40 % Modulationstiefe)

Für die Untersuchungen im weiteren Verlauf erfolgt lediglich die Be-

trachtung der Ortsfrequenz aus Sicht des Projektionsmoduls. Die projektive Verzerrung der Ausgabe durch die Zielfläche wird dabei nicht berücksichtigt. Im Rahmen einer ersten Untersuchung von König [107] erfolgt die Bewertung der Wahrnehmbarkeit von vier Ortsfrequenzen in der Vertikalen von 1 cpd bis 8 cpd. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die Abbildungen für die Frequenzen 1 cpd und 2 cpd eine gute Erkennbarkeit gewährleisten, während die Projektionen mit 4 cpd und 8 cpd eine schlechte bis keine Erkennbarkeit zeigen. Aus den Untersuchungen resultiert die Empfehlung für eine Ortsfrequenz von 2 cpd, da die Erkennbarkeit durch die Kamera garantiert werden soll. Die Erkennbarkeit der Projektionen leidet mit zunehmenden Ortsfrequenzen in der Vertikalen. Als Grund hierfür wird die trapezförmige Verzerrung durch die Bodenprojektion genannt, welche aufgrund der Ausrichtung des Projektionsmoduls auftritt. Infolgedessen ergibt sich in vertikaler Richtung eine deutlich geringere Auflösung, da die Pixel in vertikaler Richtung auf der Fahrbahnoberfläche größer skaliert werden. Zudem beeinflussen die Fahrbahneigenschaften (Reflexionseigenschaften, Beschaffenheit) die Abbildungsqualität der Projektionen.

Die horizontale Ortsfrequenz zeigt sich in den untersuchten Linienbreiten (8, 16, 32, 64, vgl. Tabelle 5.1) stets gut sichtbar, weshalb keine optimale Ortsfrequenz vorliegt. Stattdessen wird eine frei wählbare Ortsfrequenz genannt, jedoch wird eine Ortsfrequenz von mindestens 0,64 cpd empfohlen. Für die Fehlstellungsdetektion ist theoretisch ein erkennbares Merkmal ausreichend. Durch eine hohe Ortsfrequenz entsteht jedoch eine Vielzahl von Eckpunkten im Schachbrettmuster, wodurch eine robustere Detektion der Fehlstellung möglich ist.

Wie in Kapitel 4.2 erläutert, hat das menschliche Auge eine maximale Empfindlichkeit bei Frequenzen zwischen 1 – 8 cpd. Da Frequenzen

oberhalb dieser Werte kaum darstellbar bzw. wahrnehmbar sind, erfolgt die Wahl der Frequenzen für eine optimierte Wahrnehmung durch die Kamera. Das Verbergen der Projektionen basiert im weiteren Verlauf lediglich auf der zeitlichen Komponente.

5.2 VORSTUDIE: WAHRNEHMBARKEIT VON PROJEKTIONEN IM STATISCHEN FALL

Die Wahrnehmbarkeit der Projektionen erfordert eine Validierung durch Probanden, um eine fundierte Beurteilung des Verfahrens zu gewährleisten. Im Rahmen einer Expertenbefragung soll die Wahrnehmbarkeit der zeitlich modulierten Projektionen unter Berücksichtigung der optischen Ausprägung bewertet werden. Die Untersuchung erfolgte in Zusammenarbeit mit König [107]. Die Befragung liefert eine erste Einschätzung über das Potenzial der Methode, Projektionen mittels zeitlicher Modulation zu verbergen. Sollte sich eine Wahrnehmbarkeit der einzelnen Projektionen zeigen, so ist der Einfluss der Distanz und der Modulationstiefe zu bewerten.

5.2.1 METHODIK

Die Untersuchung der Wahrnehmbarkeit der festgelegten Projektionen erfolgt für verschiedene Distanzen (25 m, 30 m, 35 m, 40 m) und zwei Modulationstiefen (30 %, 40 %). Somit liegen acht zu bewertende Zustände vor. Das Schachbrettmuster wird nicht auf die gesamte Lichtverteilung angewendet, sondern in der Vertikalen auf einen Zyklus beschränkt. Dadurch soll berücksichtigt werden, ob sich die Position

VORSTUDIE: WAHRNEHMBARKEIT VON PROJEKTIONEN IM STATISCHEN FALL

der Projektion auf die Wahrnehmbarkeit auswirkt. Zudem erfolgt für einen Vergleich eine Untersuchung bei einer Modulationstiefe von 30 % und 40 %. Sollten unerwünschte Effekte bei der maximalen Modulationstiefe auftreten, so liegen Bewertungen für eine geringere Modulationstiefe vor. Die resultierenden Projektionen sind beispielhaft für zwei Modulationstiefen und zwei Distanzen in Abbildung 5.6 dargestellt.

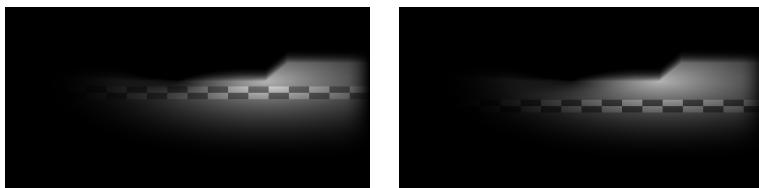


Abbildung 5.6: Modifizierte Abblendlichtverteilungen mit einer Ortsfrequenz von je 2 cpd, bei unterschiedlichen Modulationstiefen (links: 30 %, rechts: 40 %) und Distanzen (links: 35 m, rechts: 25 m)

Für die Befragung soll möglichst das „Worst-Case-Szenario“ abgebildet werden. Die kritische Flimmerfrequenz sinkt mit zunehmendem Alter, weshalb vorzugsweise eine junge Probandengruppe mit Kenntnissen im Bereich Lichttechnik ausgewählt werden sollte. Zudem sollen die Probanden maximal über das Vorgehen sensibilisiert werden, einschließlich der Details zur Projektion sowie der angewandten Methodik. Mit der Kenntnis über die zu erwartende Erscheinung ist der Worst-Case beschrieben. Zudem erfolgt in diesem Zeitraum unter anderem die Dunkeladaptation des Auges.

Die zu bewertenden Schlüsselaussagen des Interviews lauten:

- *Es ist ein Schachbrett muster in der Abblendlichtverteilung sichtbar*
- *Es ist Flimmern in der Abblendlichtverteilung wahrnehmbar*

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Die Bewertung der Fragen erfolgt anhand einer geraden, ordinalen Likert-Skala, d.h. es existiert keine neutrale Bewertungsmöglichkeit, wodurch eine Tendenz erzwungen wird (vgl. Tabelle 5.2). Ein Schachbrettmuster kann entweder erkannt werden oder nicht.

Tabelle 5.2: Likert-Skala zur Bewertung der Aussagen

Szenario X	Aussage A	Aussage B
Trifft voll zu		
Trifft eher zu		
Trifft eher nicht zu		
Trifft überhaupt nicht zu		

5.2.2 VERSUCHSAUFBAU

Die Untersuchung findet im Lichtassistentenzentrum (LAZ) der AUDI AG statt. Der 120m lange Lichtkanal erlaubt es, kontrollierte, nächtliche Bedingungen herzustellen. Die gesamte Beleuchtung ist individuell steuerbar und die Wände sind mattschwarz lackiert, sodass mögliche Störquellen, wie ungewollte Reflexionen, eliminiert werden. Zudem ist das LAZ mit einem strassenähnlichen Bodenbelag ausgestattet. In Summe ergibt sich eine Untersuchungsumgebung unter idealen und kontrollierbaren Bedingungen. Die Untersuchung findet in dem vollständig abgedunkelten LAZ statt, sodass keine externen Beleuchtungseinflüsse existieren.

Als Versuchsfahrzeug fungiert ein Audi SQ8 e-tron mit einem serienmäßigen DML-Scheinwerfer, welcher für die Ausgabe der Projektionen verwendet wird. Der Aufbau des Versuchsfahrzeugs ist Kapitel 3.1

zu entnehmen. Das Fahrzeug ist so positioniert, dass die Projektion vollständig auf der Fahrbahn auftrifft. Die Umsetzung der zeitlichen Modulation erfolgt durch die Generierung vorgefertigter Videos aus den zuvor erstellten Einzelbildern. Die Videos werden durch einen Messrechner, welcher mit den Projektionsmodulen verbunden ist, ausgegeben. Während der Versuchsleiter außerhalb des Fahrzeugs das Experiment leitet, erfolgt die Bewertung durch die Probanden aus der Fahrerperspektive.

5.2.3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Zu Beginn erfolgt der Empfang der Versuchsteilnehmer durch den Versuchsleiter im LAZ. Anschließend erfolgt eine Einführung in das Experiment, wobei die Probanden möglichst detailliert über den Ablauf und die zu erwartende Darstellung in Kenntnis gesetzt werden. Während der Erläuterung und der Aufnahme demographischer Daten erfolgt die Adaptation der Augen auf die Umgebungsbedingungen. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der begrenzten Durchführungszeit keine vollständige Adaptation stattfindet. Zu den demographischen Daten gehören das Alter, die Erfahrung in der automobilen Lichttechnik und die korrigierte Fehlsichtigkeit des Probanden, wobei die Antwortmöglichkeiten durch die Erhebungsrichtlinien der AUDI AG definiert sind. Anschließend nimmt der Proband auf dem Fahrersitz Platz, womit die Untersuchung beginnt.

Beginnend mit der ersten Projektion, welche durch einen Kontrast von 40 % und einer Distanz von 25 m gekennzeichnet ist, erfolgt die Bewertung der Schlüsselaussagen durch die Probanden, mit dem Wissen, dass ein Schachbrettmuster abgebildet wird und dass durch die zeitliche Modulation Flimmern auftreten kann. Die Reizdauer beträgt

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

mindestens 10 s je Video, wodurch ausreichend Zeit für eine Beurteilung der Lichtverteilung zur Verfügung steht. Anschließend erfolgt die Darstellung aller weiteren Zustände mit steigender Distanz. Zuletzt wird das Verfahren für den zweiten Kontrast (30 %) wiederholt und durch den Probanden bewertet. Aufgrund der geringen Untersuchungsdauer je Proband und der Kenntnis über die dargestellten Projektionen durch die Probanden wurde auf eine randomisierte Reihenfolge der einzelnen Darstellungen verzichtet.

5.2.4 ANALYSE DER ERGEBNISSE

Im Rahmen des Experiments erfolgte die Befragung von sieben Probanden, welche im Bereich der automobilen Lichttechnik beruflich tätig sind und somit eine gewisse Expertise hinsichtlich der Beleuchtung am Automobil vorweisen. Zudem befindet sich der Großteil der Gruppe in einem jungen Alter. Eine demographische Auswertung der Probandengruppe ist in Abbildung 5.7 in Form eines Sankey-Diagramms dargestellt.

Die Befragung der Probanden gibt Aufschluss darüber, ob die zeitliche Modulation der Projektionen für das Verbergen der Merkmale geeignet ist, zum einen durch die Bewertung der Sichtbarkeit des Schachbretts und zum anderen durch die Bewertung über das Auftreten von Flimmereffekten. Gleichzeitig wird der Einfluss der Modulationstiefe und der Distanz der Projektionen berücksichtigt.

Für die statistische Auswertung der Untersuchung werden folgende Nullhypotesen angenommen:

VORSTUDIE: WAHRNEHMBARKEIT VON PROJEKTIONEN IM STATISCHEN FALL

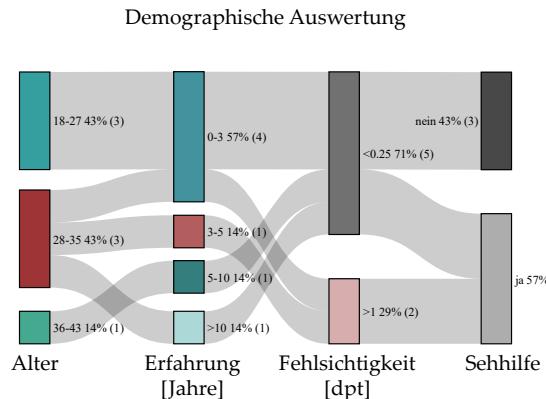


Abbildung 5.7: Demographic Auswertung der teilnehmenden Probanden in Form eines Sankey-Diagramms, erstellt mit DATatab [108]

$H_{0,a}$: Es gibt keinen Unterschied in der Sichtbarkeit des Schachbretts bei unterschiedlicher Distanz und Modulationstiefe.

$H_{0,b}$: Es gibt keinen Unterschied in der Flimmerwahrnehmung bei unterschiedlicher Distanz und Modulationstiefe.

Die Nullhypotesen werden angenommen, wenn die Auswertung der Daten für alle Bedingungen keinen signifikanten Unterschied zeigt.

Zunächst erfolgt eine deskriptive Analyse der Sichtbarkeit des Schachbretts sowie der Flimmerwahrnehmung mit Hilfe von Box-Whisker-Plots. Abbildung 5.8 zeigt die Bewertung der Sichtbarkeit des Schachbretts für alle Zustände.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

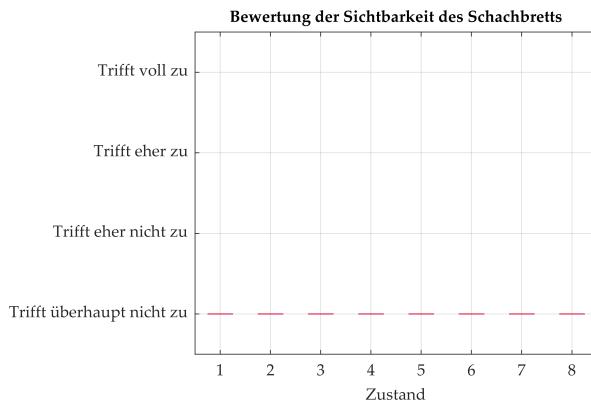


Abbildung 5.8: Box-Whisker-Plot: Bewertung der Sichtbarkeit des Schachbretts für alle Parameterkombinationen der Modulationstiefe und Distanz beginnend mit Modulationstiefe 1 = 40 %, Distanz 1 = 25 m

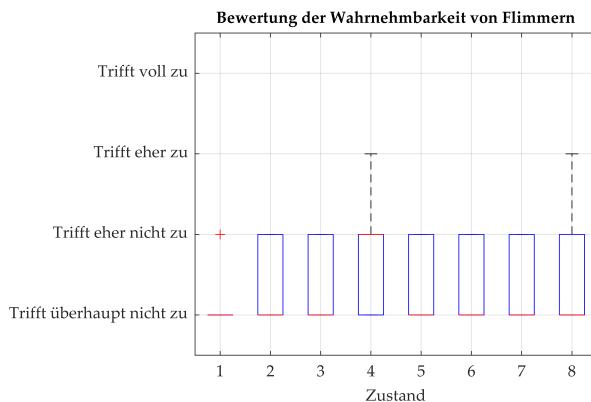


Abbildung 5.9: Box-Whisker-Plot: Bewertung der Flimmerwahrnehmung für alle Parameterkombinationen der Modulationstiefe und Distanz beginnend mit Modulationstiefe 1 = 40 %, Distanz 1 = 25 m

Aus der Darstellung geht hervor, dass für jede Parameterkombination eine vollständige Konzentration aller Bewertungen beim niedrigsten Skalenwert („Trifft überhaupt nicht zu“) vorliegt.

Für die Bewertung der Flimmerwahrnehmung zeigt Abbildung 5.9, dass die Bewertungen überwiegend beim niedrigsten Skalenwert („Trifft überhaupt nicht zu“) liegen. Mit einem Median, welcher der Bewertung „Trifft überhaupt nicht zu“ entspricht, wird deutlich, dass auch das Flimmern über alle Parameterkombinationen kaum wahrnehmbar ist.

Um die deskriptiven Beobachtungen statistisch zu überprüfen, erfolgt ein Friedman-Test über alle Zustände. Der Friedman-Test ist ein nichtparametrischer Test für abhängige Stichproben und wird verwendet, wenn die Voraussetzungen einer Varianzanalyse (normalverteilt, intervallskaliert) nicht erfüllt sind. [109] Aufgrund des eindeutigen Ergebnisses für die Sichtbarkeit des Schachbretts wird die Nullhypothese $H_{0,a}$ beibehalten. Für die Flimmerbewertung erfolgt eine statistische Überprüfung mittels Friedman-Test:

Tabelle 5.3: Flimmerbewertung für alle Zustände, wobei gilt Zustand 1 = Kontrast 1, Distanz 1; „Trifft überhaupt nicht zu“ = 1 ... „Trifft voll zu“ = 4

Proband	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	Z ₇	Z ₈
1	1	2	1	2	1	2	1	2
2	1	1	1	1	2	1	1	1
3	2	1	1	3	2	1	1	3
4	1	2	1	1	1	2	1	1
5	1	1	2	1	1	1	2	1
6	2	1	1	2	2	1	1	2
7	1	2	1	1	1	2	1	1

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Je Proband werden den einzelnen Messpunkten (vgl. Tabelle 5.3) Ränge zugeordnet, dem niedrigsten Wert der niedrigste Rang, und anschließend die Rangsummen R_i gebildet (vgl. Tabelle 5.4). Durch die acht Zustände resultieren somit acht zuweisbare Ränge. Für identische Messwerte innerhalb einer Zeile erfolgt die Zuweisung des Mittelwerts der beteiligten Ränge (verbundene Ränge). Vier Zustände teilen sich die ersten vier Ränge, wodurch ein Mittelwert von 2,5 folgt.

Tabelle 5.4: Rangzuordnung im Rahmen des Friedman-Test

Proband	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8
1	2.5	6.5	2.5	6.5	2.5	6.5	2.5	6.5
2	4.5	4.5	4.5	4.5	8	4.5	4.5	4.5
3	4.5	2.5	2.5	7.5	4.5	2.5	2.5	7.5
4	3.5	7.5	3.5	3.5	3.5	7.5	3.5	3.5
5	3.5	3.5	7.5	3.5	3.5	3.5	7.5	3.5
6	6.5	2.5	2.5	6.5	6.5	2.5	2.5	6.5
7	3.5	7.5	3.5	3.5	3.5	7.5	3.5	3.5
R_i	28.5	34.5	26.5	35.5	32	34.5	26.5	35.5

Aus der Probandenanzahl n , der Anzahl der Messwiederholungen (Zustände) k und den Rangsummen R_i folgt Gleichung 5.2, wobei durch die verbundenen Ränge eine Korrektur erforderlich ist. Für die exakte Berechnung sei auf [109] verwiesen.

$$\chi^2 = \frac{12}{nk(k+1)} \sum_{j=1}^k R_j^2 - 3n(k+1) \quad (5.2)$$

Liegt der ermittelte Wert unterhalb des kritischen Wertes von

$\chi^2_{krit}(df, \alpha)$, so wird die Nullhypothese beibehalten. Im vorliegenden Fall beschreiben sieben Freiheitsgrade df bei einem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ einen kritischen Wert von $\chi^2_{krit}(7, 0,05) = 14,067$. Aus der Berechnung ergibt sich ein korrigierter χ^2 -Wert von 4,44. Zudem ergibt sich aus dem Friedman-Test ein nicht signifikanter p-Wert von $p = 0,73 > 0,05$, wodurch die Nullhypothese nicht verworfen wird.

Somit bestätigt der statistische Test die deskriptive Beobachtung, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Parameterkombinationen bestehen. In keinem Fall wird das Schachbrett muster erkannt und in nahezu keinem Fall tritt Flimmern auf, weshalb die Eignung der zeitlichen Modulation für das Verbergen der Projektionen für das beschriebene Szenario gegeben ist. Basierend auf dieser Erkenntnis folgen weitere Untersuchungen im Verkehrsraum unter nicht steuerbaren Umgebungsbedingungen, um eine fundierte Aussage über die Anwendbarkeit der Methodik unter realen Verkehrsbedingungen treffen zu können.

5.3 UNTERSUCHUNG IM VERKEHRSRAUM

Die Anwendbarkeit des zuvor untersuchten Ansatzes im Verkehrsraum erfordert eine Bewertung unter realen Umgebungsbedingungen. Im realen Betrieb existieren diverse externe Faktoren, wie beispielsweise die Fahrzeugdynamik, wechselnde Beleuchtungsverhältnisse, unterschiedliche Witterungsbedingungen, verkehrsspezifische Szenarien oder topographische Einflüsse, welche die Ausprägung sowie die Wahrnehmbarkeit der Projektionen beeinflussen. Ziel ist es, eine

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Aussage darüber zu treffen, ob sich das Verfahren für eine Fehlstellungsdetektion im Fahrbetrieb eignet. Weiter soll anhand der Untersuchungen festgestellt werden, in welchen Szenarien und unter welchen Bedingungen das Verfahren anwendbar ist. Daraus ergeben sich Anforderungen und Limitationen für die praktische Anwendbarkeit des Ansatzes im Fahrbetrieb.

Im ersten Schritt erfolgt eine Untersuchung der Wahrnehmbarkeit für ein stillstehendes Fahrzeug im öffentlichen Verkehrsraum. Im weiteren Verlauf erfolgt eine Validierungsfahrt unter mesopischen Bedingungen, woraus Szenarien für die Anwendbarkeit des Prinzips abgeleitet werden können. Die Untersuchungen erfolgten in Zusammenarbeit mit Stublla. [110]

5.3.1 WAHRNEHMBARKEIT IM STATISCHEN FALL

Für den vorliegenden Anwendungsfall wird als Basis für die Bewertung der Flimmerwahrnehmung die Veröffentlichung von Kelly [55] herangezogen. Im Rahmen der Untersuchung erfolgen Leuchtdictemessungen im Verkehrsraum unter realen Bedingungen, wodurch Rückschlüsse auf die Flimmerwahrnehmung resultieren.

Aus den Erkenntnissen der Expertenbefragung ist bekannt, dass für keine der untersuchten Parameterkombinationen Flimmern wahrgenommen wird. Für eine verbesserte Sichtbarkeit der projizierten Muster aus Sicht der Kamera erfährt im weiteren Verlauf jedes individuelle Pixel die maximale Modulationstiefe, wodurch ein besserer Kontrast erzielt wird. Anhand einer Leuchtdictemessung wird die tatsächliche Modulationstiefe ermittelt. Zwar kann diese aus den zur Projektion verwendeten Ausgangsbildern berechnet werden, jedoch

sind dabei Einflüsse durch die Umgebung, wie die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn, externe Störlichtquellen oder Einflüsse durch das Projektionsmodul nicht berücksichtigt.

Die Leuchtdichtemessungen erfolgten mit der Leuchtdichtekamera LMK Color (TTDCCD140) der Firma TechnoTeam. Die statische Untersuchung erfolgte auf einem öffentlichen Parkplatz, um realitätsnahe Bedingungen ohne störende Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten. Die Leuchtdichtekamera wurde auf dem Armaturenbrett hinter dem Lenkrad positioniert, sodass sie im Blickfeld eines Fahrzeugführers liegt. Abbildung 5.10 illustriert die Leuchtdichtemessung für das projizierte Muster in logarithmischer Darstellung.

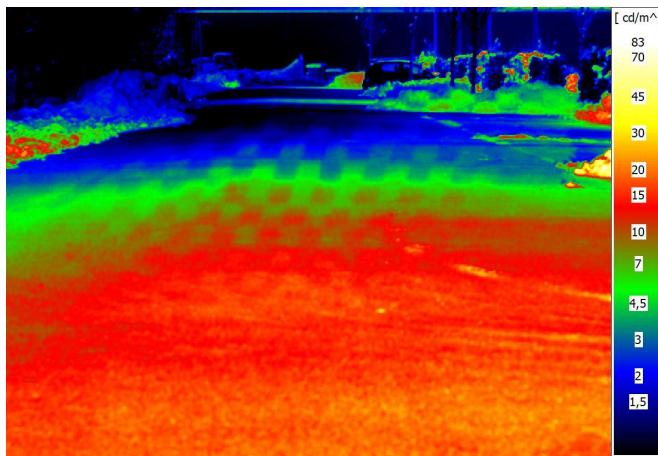


Abbildung 5.10: Leuchtdichteaufnahme des projizierten Musters in logarithmischer Darstellung

Aus der Leuchtdichtemessung ergibt sich über den gesamten Aufnahmebereich eine mittlere Leuchtdichte von etwa $10 \frac{cd}{m^2}$. Mit der

zugehörigen Leuchtdichtheaufnahme des inversen Musters erfolgt die Ermittlung der Modulationstiefe D_m für jedes Pixel. Die zugehörige Darstellung zeigt Abbildung 5.11.

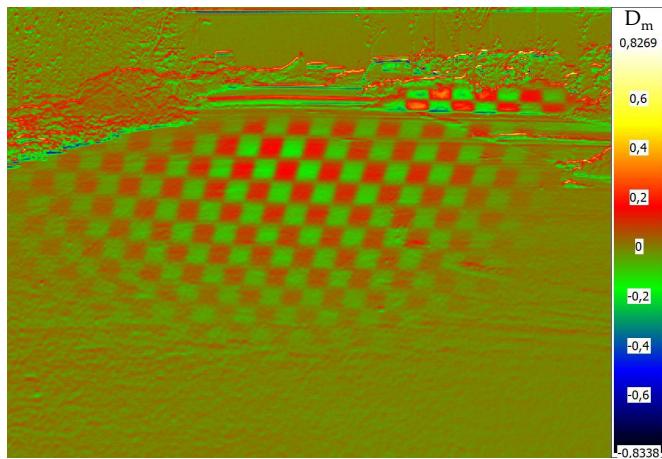


Abbildung 5.11: Leuchtdichtheaufnahme des projizierten Musters in logarithmischer Darstellung

Aus der Abbildung lässt sich die generierte Strukturlichtverteilung deutlich erkennen. Die Modulationstiefe der Projektion, welche auf der Fahrbahn auftrifft, liegt etwa in einem Wertebereich zwischen 0,1 und 0,2. Orthogonale Projektionsbereiche bzw. Objekte innerhalb der Musterprojektion (hier: Schneehügel) erreichen einen Wert von D_m bis etwa 0,55. Die genannten Bereiche sind in Abbildung 5.12 hervorgehoben. Aus Gründen der Übersicht wurde die Darstellung der normalen Projektion mit ihrem Komplement in einer Grafik abgebildet. Entsprechend gilt für die Skalierung eine betragsmäßige Interpretation der Modulationstiefe.

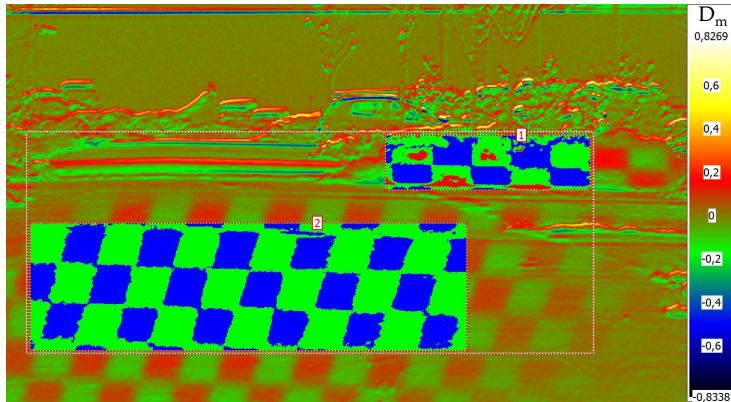


Abbildung 5.12: Leuchtdichteaufnahme des projizierten Musters in logarithmischer Darstellung. Die hervorgehobenen Bereiche stellen die Regionen mit höchster Modulationstiefe dar.

Aus den ermittelten Werten für die Modulationstiefe und Adaptationsleuchtdichte, den Kennlinien für die CFF in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte und Modulationstiefe (vgl. Kapitel 4.3, Abbildung 4.3) ergibt sich für die kritische Flimmerfrequenz ein Bereich um etwa 30 Hz. Diese Frequenz liegt im Grenzbereich der maximal darstellbaren Frequenz durch das Projektionsmodul.

Eine subjektive Betrachtung der Szene bestätigt die Aussage über die Flimmerwahrnehmung. Auf der Fahrbahnoberfläche konnte kein Flimmern wahrgenommen werden, während Projektionen auf Objekte in einer erhöhten Leuchtdichte resultieren und damit Flimmern verursachen. Trotz der vorhandenen Straßenbeleuchtung, welche die Projektion überlagert, ist das Muster im statischen Betrieb stets

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

sichtbar. Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgen weitere Bewertungen der zeitlich modulierten Projektionen im Fahrbetrieb, um deren Wahrnehmbarkeit in weiteren Verkehrsszenarien zu überprüfen.

5.3.2 ERPROBUNGSFAHRT ZUR BEWERTUNG ZEITLICH MODULIERTER PROJEKTIONEN

Um eine erste Einschätzung über die Eignung der zeitlichen Modulation im dynamischen Fahrbetrieb zu erhalten, erfolgt eine Erprobungsfahrt bei mesopischen Bedingungen. Für die Fahrt wird die zuvor im statischen Fall untersuchte Musterprojektion zeitlich moduliert. Die Strecke beinhaltet sowohl innerörtliche als auch außerörtliche Abschnitte, um möglichst viele Szenarien und Straßenkategorien abzudecken. Ziel ist es, bestimmte Situationen, in denen das Flimmern (verstärkt) auftritt, zu ermitteln, um somit Rahmenbedingungen für das Verfahren zu definieren.

Der untersuchte Streckenverlauf ist Abbildung 5.13 zu entnehmen. Die Erprobung beginnt am *Tor 9* der Technischen Entwicklung von Audi und führt über die Landstraße und Ortschaften zum Zielparkplatz in der *Otto-Hahn-Straße, Ingolstadt*. Die Rückfahrt zum Startpunkt erfolgt über einen Autobahnabschnitt der A9, sodass auch diese Straßenkategorie abgedeckt ist.

Die definierte Route beinhaltet Streckenabschnitte, welche urbane als auch rurale Gebiete umfassen und somit Straßenkategorien wie innerörtliche Straßen, Landstraßen und Autobahnen einschließt. Aus der Erprobungsfahrt ergeben sich diverse Beobachtungen, welche die Anwendung der Methodik eingrenzen.

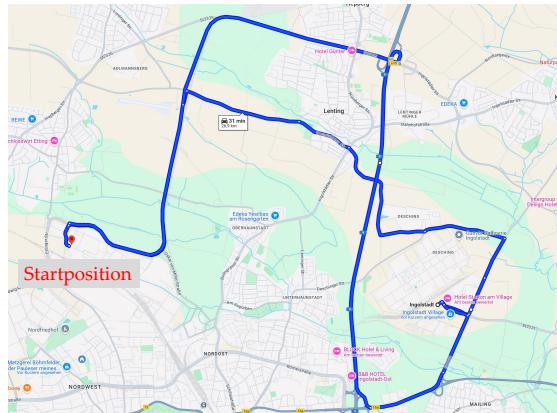


Abbildung 5.13: Strecke zur Bewertung der Flimmerwahrnehmung unter realen Umgebungsbedingungen [111]

INNERÖRTLICHER VERKEHR

Der innerörtliche Verkehr zeichnet sich durch eine hohe Komplexität und Dynamik aus. Grundsätzlich herrscht eine hohe Verkehrsdichte und ein hoher unkontrollierbarer Einfluss durch verschiedene Verkehrsteilnehmer. Die komplexe Infrastruktur, bestehend aus Kreuzungen, Einmündungen, Gebäuden, Verkehrszeichen, Ampeln und weiteren Objekten, beeinflusst die Zielfläche der Projektionen, sodass unerwünschte Lichtartefakte auftreten können. Objekte im Projektionsfeld, welche eine hohe Leuchtdichte bewirken, resultieren in einem erhöhten Auftreten von TLA.

Bei hoher Verkehrsdichte ist eine vollständige Projektion auf die Fahrbahn stark eingeschränkt, weshalb Projektionen oftmals auf Verkehrsteilnehmern abgebildet werden. Gerade im Bereich retroreflektiver

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Objekte (Kennzeichen) lässt sich ein starkes Flimmern beobachten. Weitere deutliche Auffälligkeiten zeigen sich an Kreuzungen, an denen die Projektionen auf Gebäuden abgebildet werden.

Bei kontinuierlichem Verkehrsfluss bewirken Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs eine relative Veränderung der Projektionsfläche zu Beobachter und emittierendem Modul, wodurch Stroboskoeffekte zu beobachten sind. Diese Auffälligkeit spiegelt sich oft bei Kurvenfahrten mit geringen Radien wider, da in solch einem Szenario eine steile Veränderung der Projektionsfläche stattfindet.

Aufgrund der Komplexität und Dynamik des innerörtlichen Verkehrs resultieren viele unkontrollierbare Faktoren, welche die Anwendbarkeit zeitlich modulierter Projektionen einschränken. Somit erfolgt kein Einsatz des Systems im innerörtlichen Bereich. Als Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsbedingung kann beispielsweise die vorliegende Straßenkategorie oder eine Geschwindigkeitsschwelle fungieren.

AUSSERÖRTLICHER VERKEHR - LANDSTRASSEN

Landstraßen zeichnen sich im Allgemeinen durch eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h aus. [112] In Bereichen hoher Geschwindigkeiten liegen veränderte Dynamikeinflüsse vor, welche durch das Fahrverhalten sowie die Trassierung von Fahrtstrecken bedingt sind. Für eine Fahrt bei konstanter Geschwindigkeit und angenommener ebener Strecke resultiert eine homogene Wahrnehmung der Projektionen, da keine relative Veränderung zwischen Projektionsfläche und Projektionsmodul bzw. Beobachter vorliegt. Bedingt durch reale Streckenverläufe resultieren Fahrmanöver für unterschiedliche Kurvenradien, wodurch die zeitlich modulierten Einzelprojektionen auf verschiedene Bereiche abgebildet werden.

Folglich liegt eine Inhomogenität der Leuchtdichte über die Zeit vor, welche sich in TLA widerspiegelt.

Aus der Erprobungsfahrt geht hervor, dass Abschnitte mit geringen Kurvenradien und umgebender Vegetation besonders präsente Artefakte hervorrufen. Jegliche schnelle Variation der optischen Ausprägung der Projektion verursacht in den meisten Fällen TLA. Bei geradlinigen Streckenabschnitten zeigt sich die Methodik als geeignet. Nicht zu vernachlässigen sind jedoch Bereiche seitlich der Strecke, die von der Lichtverteilung abgedeckt sind. Je nach Vegetation oder Bebauung können TLA im peripheren Sichtbereich auftreten.

Im Hinblick auf die Abbildung der Lichtverteilung über den Projektionsbereich gilt folgende Beobachtung. Basierend auf erhöhten Geschwindigkeiten und den damit verbundenen Abständen zu vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern wird die Projektion in vielen Fällen vollständig auf der Fahrbahn abgebildet. Während der Erprobung konnte in solchen Szenarien kein Stroboskeffekt wahrgenommen werden.

Basierend auf prädiktiven Streckendaten könnte ein Schwellwert für den Kurvenradius festgelegt werden, ab dem das System aktiviert bzw. deaktiviert wird. Da jedoch im peripheren Sichtbereich durch die Vegetation und Bebauung seitlich der Fahrbahn unkontrollierbare Einflüsse existieren, ist eine Einschränkung des Projektionsbereichs zielführend. Die Einschränkung kann sowohl in lateraler (Spurbegrenzung) als auch in longitudinaler Richtung (Abstand zum vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer) erfolgen.

AUTOBAHNVERKEHR

Im Hinblick auf die Fehlstellungsdetektion liefern Autobahnen und Bundesstraßen das größte Potenzial für die Anwendung des Prinzips (vgl. Totzauer [10]). Autobahnen sind für hohe Geschwindigkeiten ausgelegt, sodass Trassierungen mit möglichst großen Kurvenradien und geringen Steigungsänderungen vorliegen. [113] Bei vorausschauendem Fahrverhalten resultieren konstante Fahrgeschwindigkeiten, geringe Querbeschleunigungen und fließende Richtungswechsel, wodurch eine ruckartige Dynamikänderung reduziert wird. Daraus folgt eine gute Basis für das Verfahren.

Aus der Erprobungsfahrt gehen folgende Beobachtungen hervor:

- Stroboskopeffekte bei Autobahnauffahrten und -abfahrten durch geringe Kurvenradien und variable Projektionsflächen
- Keine Auffälligkeiten bei vollständiger Abbildung auf der Fahrbahn
- Keine Auffälligkeiten durch die Spurmarkierungen, trotz erhöhter Leuchtdichte
- teilweise Auffälligkeiten im Bereich der Schutzplanke
- Projektionen auf Verkehrsteilnehmer resultieren in Flimmern (v.a. im Kennzeichen)
- Markante Beschleunigungsänderungen (Nickbewegung des Fahrzeugs) resultieren in TLA
- TLA treten aufgrund von Fahrbahnunebenheiten (Nickbewegung des Fahrzeugs) mit zunehmender Geschwindigkeit verstärkt auf

Aus den gegebenen Beobachtungen lassen sich Rahmenbedingungen definieren, unter denen das Verfahren Anwendung findet. Dazu zählen neben einem Mindestabstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen eine Geschwindigkeitsschwelle, um dynamische Bewegungen des Fahrzeugs einzugrenzen. Zudem kann als Aktivierungsbedingung die Straßenkategorie *Autobahn* festgelegt werden. Für die Randbereiche der Autobahn könnte die aktuell befahrene Fahrspur als eingrenzendes Kriterium dienen.

Unter Berücksichtigung des Gesamtziels, eine nicht-wahrnehmbare Fehlstellungsdetektion zu realisieren, bietet die Autobahn das größte Potenzial. Da die Beobachtungen lediglich auf der subjektiven Wahrnehmung von zwei Betrachtern basieren, ist für eine signifikante Aussage eine Untersuchung mit einem größeren Probandenkollektiv erforderlich. Dabei erfolgt keine Eingrenzung der Lichtverteilung, um bei Verwendung der gesamten Projektionsfläche möglichst den Worst-Case abzubilden. Zudem können weitere noch nicht beobachtete Faktoren ermittelt werden. Im weiteren Verlauf erfolgt die Untersuchung der zeitlichen Modulation auf der Autobahn im Rahmen einer Probandenstudie, wodurch eine Aussage über die Eignung der Methodik auf Autobahnen resultiert.

5.4 PROBANDENSTUDIE: WAHRNEHMBARKEIT ZEITLICH MODULIERTER PROJEKTIONEN IM FAHRBETRIEB

Basierend auf den Erkenntnissen der Untersuchungen im Verkehrsraum erfolgt die Validierung des Konzepts im Rahmen einer Pro-

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

bandenstudie. Aus den Erkenntnissen geht hervor, dass die Eignung des Verfahrens das größte Potenzial auf Autobahnen aufweist. Ziel der Studie ist es, eine Aussage über die Eignung des Verfahrens im dynamischen Fahrbetrieb unter realen Bedingungen zu gewinnen.

5.4.1 METHODIK

Im Rahmen der Studie werden drei Zustände mit verschiedenen Modulationsfrequenzen untersucht. Es werden die maximal darstellbare Frequenz von 30 Hz, die nächst geringere, darstellbare Frequenz von 15 Hz verwendet, sowie eine statische Ausgabe der serienmäßigen Abblendlichtverteilung, welche als Referenz gilt. Es wird erwartet, dass die Musterprojektion mit der unterschwelligen Frequenz von 15 Hz (unterhalb der CFF) mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit wahrgenommen wird, während die Wahrnehmbarkeit der hohen Frequenz vorzugsweise der statischen Projektion entspricht.

Die Bewertung der Lichtverteilungen erfolgt im Rahmen einer zweiründigen Erprobungsfahrt auf einer festgelegten Autobahnstrecke, wodurch reale Umgebungsbedingungen sowie Einflussfaktoren durch Verkehrsaufkommen berücksichtigt sind. Das verwendete Muster sowie dessen Komplement kann Abbildung 5.14 entnommen werden. Für jedes Pixel wurde die maximal mögliche Modulationstiefe angewendet, wodurch ein besserer Kontrast für die Merkmalsdetektion resultiert. Das Muster besitzt eine horizontale Ortsfrequenz von 1,29 cpd und eine vertikale Ortsfrequenz von 2 cpd.

Die Probanden werden hinsichtlich der Funktionsweise und der erwarteten Erscheinung nicht sensibilisiert. Sie erfahren von einer Veränderung der Lichtverteilung, jedoch nicht, wie diese konkret aussieht.

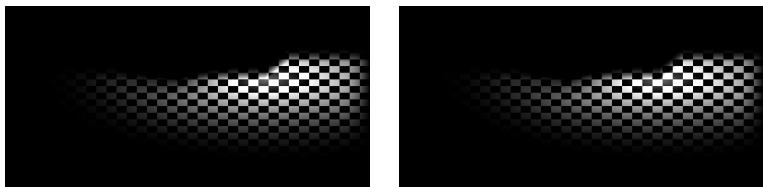


Abbildung 5.14: Modifizierte Abblendlichtverteilungen mit den Ortsfrequenzen 1,29 cpd horizontal, 2 cpd vertikal, bei maximaler Modulationstiefe je Pixel

Dadurch soll der Use-Case für einen Fahrzeugführer auf der Autobahn, der eine nicht wahrnehmbare Projektion erfährt, dargestellt werden. Zudem kann durch die Einstiegsfrage „*Ist in der Lichtverteilung etwas aufgefallen?*“ mit zusätzlicher Beschreibung der detektierten Auffälligkeit ermittelt werden, ob der Proband die tatsächliche Erscheinung (Flimmern) wahrnimmt oder eine andere Erscheinung beschreibt. Wird die Einstiegsfrage mit der richtigen Beschreibung bejaht, so erfolgt im weiteren Verlauf die Bewertung der folgenden Aussagen:

- *Es ist Flimmern in der Abblendlichtverteilung wahrnehmbar*
- *Es ist ein Muster in der Lichtverteilung wahrnehmbar*
- *Die Auffälligkeit wirkt störend*

Die ersten beiden Aussagen werden mit einer binären Skala bewertet, während das Störenempfinden mit einer 4-stufigen, ordinalen Likert-Skala bewertet wird. Insgesamt bewerten die Probanden je 24 Messpunkte, in einer randomisierten Zustands-Reihenfolge bei einer Reizdauer > 1 min. Dadurch hat der Proband ausreichend Zeit, den jeweiligen Zustand zu beobachten, Auffälligkeiten zu beschreiben und die

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Schlüsselaussagen zu bewerten. Zudem bewirkt die Randomisierung eine Reduktion systematischer Verzerrungen (Ermüdungserscheinung, Lerneffekt) und eine Vermeidung von Positionseffekten. Durch die Verwendung eines unterschwelligen Zustandes („15 Hz“) ist sicher gestellt, dass der Proband im Laufe der Studiendurchführung für die erwartete Erscheinung sensibilisiert wird.

Aus der Untersuchung soll die Eignung der zeitlichen Modulation zum Verbergen der Projektionen resultieren. Die Eignung der Methodik soll basierend auf der Wahrnehmbarkeit der Auffälligkeiten bewertet werden. Darauf aufbauend wird folgende Nullhypothese H_0 formuliert:

H_0 : Es gibt keinen signifikanten Unterschied in der Wahrnehmung von Auffälligkeiten in der Abblendlichtverteilung zwischen den drei Zuständen.

Die zugehörige Alternativhypothese H_1 lautet:

H_1 : Es gibt mindestens einen signifikanten Unterschied in der Wahrnehmung von Auffälligkeiten in der Abblendlichtverteilung zwischen den drei Zuständen.

Sollte die Nullhypothese verworfen werden, so kann anhand paarweiser statistischer Tests eine Aussage über den Einfluss der einzelnen Zustände getroffen werden. Zu erwarten ist ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen „30 Hz“ und „15 Hz“ sowie zwischen „statisch“ und „15 Hz“. Kein signifikanter Unterschied zwischen der hochfrequenten Ausgabe („30 Hz“) und der Serienlichtverteilung („statisch“) bestätigt die Eignung der zeitlichen Modulation.

5.4.2 VERSUCHSAUFBAU

Die Untersuchungen finden auf dem Autobahnabschnitt der A9 zwischen den Autobahnausfahrten „Ingolstadt - Süd“ und „Langenbruck“ statt (vgl. Abbildung 5.15). Der Abschnitt wird von jedem Probanden in zwei Durchläufen absolviert, wobei die Sequenz der Lichtverteilungen randomisiert dargestellt wird. Die Gesamtstrecke beläuft sich auf eine gesamte Länge von ca. 55 km. Alle Fahrten erfolgen in der Sommerzeit bei mindestens nautischer Dämmerung, sodass für alle Probanden vergleichbare Lichtverhältnisse vorliegen.

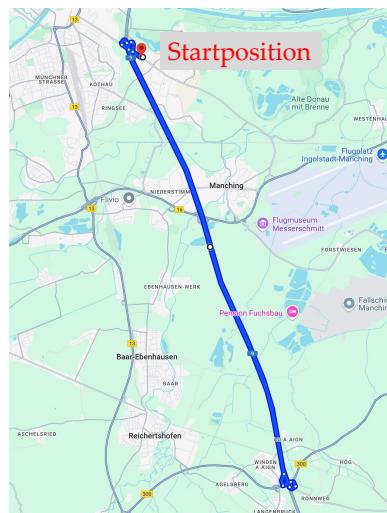


Abbildung 5.15: Festgelegte Versuchsstrecke zur Bewertung der Methodik durch die Probanden [111]

Für die Untersuchung wurde ein Audi A8 Horch modifiziert, sodass die projektive Ausgabe durch einen Messrechner gesteuert werden

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

kann. Im Gegensatz zu der in Kapitel 5.2 beschriebenen Studie erfolgt die Ausgabe der Projektionen nicht mittels vorgefertigter Videosequenzen. Die Ausgabe der Videos weist bei langen Wiedergabezeiten temporäre Diskontinuitäten in der Bildfolge auf, wodurch eine konstante Modulationsfrequenz über die gesamte Studiendurchführung nicht gewährleistet ist. Infolgedessen würde die Ausgabe der Projektionen zu unerwünschten Störeffekten führen, welche in der Wahrnehmung von Flimmern resultieren, sodass die gesamte Studie hinsichtlich des Ergebnisses stark beeinflusst wird. Aus diesem Grund erfolgt die Ausgabe über ein programmiertes MATLAB-Skript unter Verwendung der Psychtoolbox-3 (PTB-3).

Die PTB-3 ist eine freie Bibliothek für MATLAB und GNU Octave, welche für visuelle und neurowissenschaftliche Untersuchungen Anwendung findet. [114] Sie ermöglicht eine präzise Steuerung visueller und auditiver Stimuli, wodurch eine optimale Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall vorliegt.

Die Ausgabe der Projektionen wurde in Form einer Finite-State-Machine (FSM) programmiert, welche die zu untersuchenden Frequenzen als Zustände enthält. Zudem beinhaltet der Zustandsautomat einen weiteren Zustand, welcher die statische Darstellung der Musterprojektion beinhaltet. Die auszugebenden Zustände werden zu Beginn des Programmablaufs in Form eines Arrays randomisiert generiert, sodass jeder Zustand in der gleichen Häufigkeit vorkommt. Dabei ist berücksichtigt, dass dies für beide zu befahrenen Streckenrunden gilt. Insgesamt resultieren 24 zu bewertende Ausgaben, d.h. je 8 zu bewertende Darstellungen pro Zustand. Der Übergang zwischen den Zuständen erfolgt durch einen beliebigen Tastendruck am Messrechner. Zudem wurde ein Entprellmechanismus implementiert, sodass keine unerwünschten Effekte, wie mehrfache Zustandswechsel bei einem Tastendruck auftreten.

Die präzise zeitliche Steuerung der Ausgabe und die damit verbundene Einhaltung einer konstanten Framerate erfolgt unter Verwendung des Vertical Blank Intervalls (VBL), welches als Taktgeber der ausgebenden Anzeige fungiert. Anhand des VBL und einer definierten Verzögerung kann der Framewechsel für eine gewünschte Frequenz erfolgen. Im vorliegenden Anwendungsfall erfolgt der Wechsel zwischen der strukturierten Abblendlichtverteilung und deren Komplement mit einer maximalen Frequenz von 30 Hz und einer reduzierten Frequenz von 15 Hz.

Im weiteren Verlauf sei zur vereinfachten Darstellung folgende Nomenklatur festgelegt:

- Zustand 1 → 30 Hz (60 fps)
- Zustand 2 → 15 Hz (30 fps)
- Zustand 3 → statisch (Serienlichtverteilung)
- Zustand 4 → statisch (Musterprojektion)

Statisch beschreibt in diesem Fall keinen Wechsel zwischen zwei unterschiedlichen Frames, sodass ein homogenes Erscheinungsbild resultiert. Dennoch sei angemerkt, dass die Darstellungen der „statischen“ Projektionen auf einer Framerate von 60 fps basieren.

Weiterhin zu berücksichtigen gilt, dass für die Ausgabe lediglich das linke Projektionsmodul verwendet wird. Die Reduzierung auf ein Scheinwerfermodul ist für die Untersuchung der Wahrnehmbarkeit zweckmäßig, da die Ergebnisse auf das symmetrisch aufgebaute System übertragen werden können. Zudem vereinfacht dieser Ansatz die technische Umsetzung, da somit keine Synchronisierung der separaten Module zueinander erforderlich ist.

5.4.3 DATENAKQUISE

Wie die Ausgabe der Projektionen, erfolgt auch die Datenaufnahme unter Verwendung des implementierten MATLAB-Skripts. Der Wechsel der randomisierten Zustände erfolgt durch Betätigung einer beliebigen Taste. Der Tastendruck wird gleichzeitig verwendet, um die Bewertung durch den Probanden aufzunehmen. Dabei kann beispielsweise für eine Zustimmung der Wahrnehmung einer Auffälligkeit mit Betätigen der Taste „1“ in den nächsten Zustand gewechselt werden. Analog dazu kann eine konträre Bewertung mit der Taste „0“ hinterlegt werden. Im gleichen Zug wird die Eingabe in einem dynamischen Array hinterlegt, welches der Bewertung des zuletzt betrachteten Zustands entspricht. Dadurch ist sichergestellt, dass die Antworten des Probanden den richtigen Zuständen zugeordnet sind.

Für jeden Probanden wird zu Beginn ein randomisiertes Array, welches die Zustände beinhaltet, generiert. Mit Abschluss der Durchführung erfolgt die Sicherung der Antworten in einem zugehörigen Array. Somit ist eine korrekte Zuordnung zwischen dem Zustands-Array und dem Bewertungs-Array gegeben, wodurch im weiteren Verlauf eine statistische Auswertung erleichtert wird. Die weiteren Bewertungen (Flimmerwahrnehmung, Mustererkennung, Störempfinden) und zusätzliche Bemerkungen werden je zu bewertender Darstellung auf einem weiteren Endgerät notiert, um einen reibungslosen Ablauf des Versuchs zu gewährleisten.

Die Wahrnehmung einer Auffälligkeit mit einer Beschreibung, welche nicht der Erwartung entspricht, wird positiv gekennzeichnet (1), obwohl der Proband die zu erwartende Erscheinung nicht wahrnimmt. Beispielsweise kann eine Auffälligkeit als eine Veränderung der Leuchtweite beschrieben werden, welche im Rahmen der Untersuchung gar nicht dargestellt wird. Die Fehlinterpretation deutet darauf

hin, dass der Proband die tatsächliche, implementierte Modulation nicht als solche wahrnimmt und die Methodik das Ziel des Verbergens erfolgreich realisiert. Für die Serienlichtverteilung kann nur eine der Erwartung abweichende Beschreibung resultieren, da die zu untersuchende Erscheinung nicht auftritt. Somit ist sichergestellt, dass alle Zustände identisch bearbeitet werden. Die detaillierte Betrachtung einzelner Bewertungen kann Rückschlüsse auf fälschlicherweise positiv bewertete Auffälligkeiten liefern.

5.4.4 STUDIENDURCHFÜHRUNG

Zu Beginn der Studie wird der Proband durch den Versuchsleiter am festgelegten Startort empfangen. Zu diesem Zeitpunkt sind bereits alle technischen Vorbereitungen für die Versuchsdurchführung und Datenakquise abgeschlossen. Zudem wird durch die Anfahrt eine vollständige Adaptation an die Umgebungsbedingungen angenommen. Während des gesamten Verlaufs ist das Head-Up-Display (HUD) deaktiviert, sodass eine freie Sicht ohne Störfaktoren auf die gesamte Lichtverteilung vorliegt. Im weiteren Verlauf erfolgt die Aufnahme der demographischen Daten des Probanden sowie die Sensibilisierung bzgl. der Datenschutzerklärung.

Zunächst wird der Proband über den Versuchsablauf in Kenntnis gesetzt. Dazu zählen neben dem Streckenverlauf und einem Fahrverhalten ohne konkrete Vorgaben auch die bevorstehende Aufgabe zur Bewertung der Lichtverteilungscharakteristik durch die Beantwortung konkreter Fragen. Der Proband wird darüber informiert, dass während der Versuchsdurchführung Veränderungen an der Lichtverteilung vorgenommen werden, jedoch werden diese nicht weiter konkretisiert. Der Versuchsleiter befindet sich zum Zeitpunkt des Versuchs auf der Beifahrerposition und leitet die Studie. Mit dem Befah-

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

ren der Autobahnauffahrt beginnt der implementierte Programmablauf.

Beginnend mit *Zustand 3*, welche die serienmäßige Abblendlichtverteilung darstellt, erfolgt das Umschalten in den ersten zu bewertenden Zustand. Dieser wird für mindestens 60 s beibehalten, wodurch dieser eine ausreichende Reizdauer für den Probanden enthält. Anschließend erfolgt die Bearbeitung des Fragebogens zur Erfassung der Aussagen für den aktuellen Zustand. Sollte keine Auffälligkeit wahrgenommen werden, so erfolgt das Umschalten in den nächsten Zustand mit negativer Bewertung des Aktuellen. Bei Wahrnehmung von Auffälligkeiten wird zusätzlich die Flimmerwahrnehmung, Muster-Erkennung, sowie das Störempfinden durch den Probanden bewertet. Zudem ergänzt der Versuchsleiter Notizen für bemerkenswerte Szenarien, wie beispielsweise hohe Geschwindigkeiten, Projektionen auf andere Verkehrsteilnehmer oder weitere Szenarien, die die Methodik beeinträchtigen können.

Die erste Hinfahrt (bis zur Autobahnausfahrt „Langenbrück“) beinhaltet sechs zu bewertende Darstellungen, analog dazu die Rückfahrt. Bei jeder Autobahnausfahrt wird der letzte Zustand beibehalten, da die Bewertung lediglich auf der Autobahn stattfindet. Insgesamt durchläuft der Proband zwei Runden der Teststrecke, wodurch sich in Summe 24 Messpunkte ergeben. Durch die Verwendung des unterschweligen Zustandes ist sichergestellt, dass die Probanden im Laufe der Versuchsfahrt auf die zu erwartende Erscheinung sensibilisiert werden. Solange der Proband die zu erwartende Erscheinung nicht erfährt, beispielsweise durch den unterschweligen Zustand, ist davon auszugehen, dass die Methode eine gute Eignung zeigt und der Proband keine Auffälligkeiten wahrnimmt, sofern auch *Zustand 1* nicht erkannt wird.

Das Ende der Befragung wird mit *Zustand 4* signalisiert, welcher

die statische Musterprojektion darstellt. An dieser Stelle erfolgt die Aufklärung des Probanden über das gesamte Prinzip sowie die zu erwartenden Erscheinungen. Zuletzt erfolgt eine letzte Umschaltung in die Serienlichtverteilung bis zum Endziel der Versuchsstrecke.

5.4.5 ANALYSE DER ERGEBNISSE

Im Rahmen der Untersuchung erfolgte die Befragung von 15 Probanden, welche Kenntnisse im Bereich der automobilen Lichttechnik vorweisen. Dadurch liegt eine erhöhte Sensibilisierung bzgl. Charakteristika in der Lichtverteilung vor. Die Modifizierung im Serienfahrzeug bedingt, dass lediglich Probanden mit Besitz eines sog. Prototypenführerscheins das Fahrzeug im öffentlichen Verkehr führen dürfen.

Die demographische Auswertung des Probandenkollektivs kann Abbildung 5.16 entnommen werden. Ersichtlich ist eine ähnliche Verteilung über alle Altersgruppen hinweg, wobei die letzte Altersgruppe mit lediglich einem Probanden gering vertreten ist. Für die Bewertung der Lichtverteilung ist gerade die jüngere Zielgruppe das kritische Publikum, da dort in der Regel eine erhöhte Flimmerwahrnehmung zu erwarten ist. Entsprechend ist auch die Erfahrung im Bereich der automobilen Lichttechnik zu bewerten. Mit zunehmender Erfahrung ist eine erhöhte Sensibilisierung für die Eigenschaften der Lichtverteilung zu erwarten.

Eine erste Einschätzung der Methodik liefert die deskriptive Analyse für das Auftreten der Auffälligkeiten in der Lichtverteilung mit Hilfe einer absoluten Darstellung sowie mittels Box-Whisker-Plots (vgl. Abbildungen 5.17 und 5.18).

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

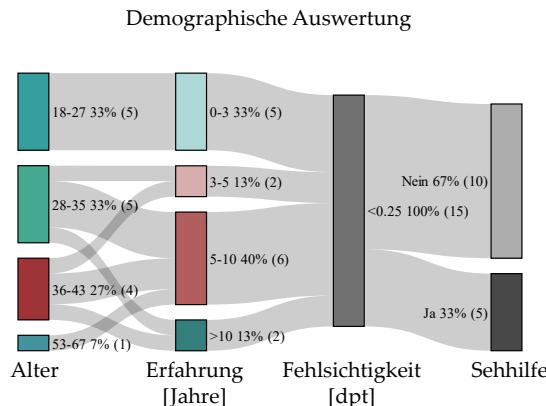


Abbildung 5.16: Demographische Auswertung der teilnehmenden Probanden in Form eines Sankey-Diagramms, erstellt mit DATatab [108]

Abbildung 5.17 zeigt eine klare Tendenz hinsichtlich des Auftretens von Auffälligkeiten je Zustand. Während die niederfrequente Musterprojektion in nahezu jedem Fall durch die Probanden erfasst wird (97,5 %), zeigen die statische Projektion der Serienlichtverteilung und die hochfrequente Musterprojektion deutlich geringere Erkennungsraten (5,0 % und 9,2 % respektive). Diese eindeutige Verteilung spiegelt sich ebenfalls in den Box-Plots wider (vgl. Abbildung 5.18).

Die zugehörigen statistischen Kennzahlen sind für alle drei Zustände in Tabelle 5.5 aufgeführt.

Die Projektion mit unterschwelliger Frequenz zeigt mit einem Median von 8 eine konsistente Bewertung für das Auftreten einer Auffälligkeit

PROBANDENSTUDIE: WAHRNEHMBARKEIT ZEITLICH MODULIERTER PROJEKTIONEN IM FAHRBETRIEB

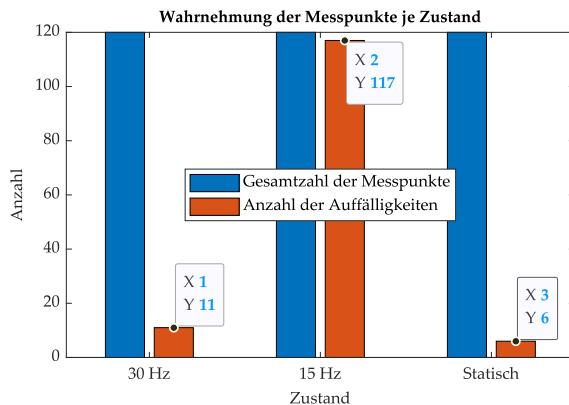


Abbildung 5.17: Absolute Darstellung: Auftreten von Auffälligkeiten für alle Zustände

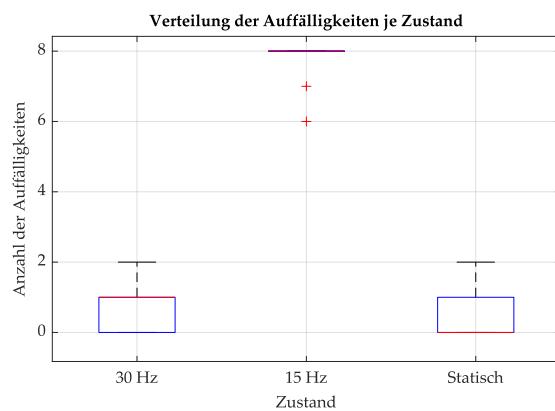


Abbildung 5.18: Box-Whisker-Plot: Auftreten von Auffälligkeiten für alle Zustände

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Tabelle 5.5: Statistische Kennzahlen der aufgetretenen Auffälligkeiten für alle drei Zustände

	30 Hz	15 Hz	Statisch
Minimum	0	6	0
Maximum	2	8	2
Median	1	8	0
Mittelwert	0,7	7,8	0,4
Standardabweichung	0,8	0,6	0,6

über alle Probanden hinweg, welche sich durch die geringe Standardabweichung bestätigt. Wie zu Beginn erwartet, wird dieser Zustand in nahezu allen Situationen erfasst. Für *Zustand 1* und *Zustand 3* ist im Hinblick auf die erkannten Auffälligkeiten erwartungsgemäß ein konträres Verhalten zu beobachten. In beiden Fällen liegen ähnliche Kennzahlen vor, wodurch ein ähnliches Verhalten der zwei Zustände vermutet wird.

Um die deskriptive Statistik zu überprüfen, erfolgt eine Anwendung interferenzstatistischer Verfahren. Dadurch soll überprüft werden, ob die Nullhypothese verworfen oder beibehalten wird. Zunächst erfolgt die Untersuchung mittels Friedman-Test, wodurch eine Aussage über die Existenz von Unterschieden zwischen den drei Zuständen getroffen werden kann. Mit Hilfe von Post-hoc-Tests kann im Anschluss festgestellt werden, zwischen welchen Zuständen signifikante Unterschiede vorliegen. Die Ergebnisse für die statistischen Tests (Friedman-Test, Wilcoxon-Test mit Bonferroni-Korrektur) sind in den Tabellen 5.6 und 5.7 zusammengefasst.

PROBANDENSTUDIE: WAHRNEHMBARKEIT ZEITLICH MODULIERTER PROJEKTIONEN IM FAHRBETRIEB

Tabelle 5.6: Ergebnisse des Friedman-Tests für die Bewertung der Nullhypothese

Freiheitsgrade	χ^2	p-Wert	α	Signifikanz ($p \leq \alpha$)
2	26,08	2,18e-06	0,05	Ja

Aus Tabelle 5.6 geht ein p-Wert hervor, welcher die Signifikanz im Unterschied bestätigt, weshalb die Nullhypothese nicht beibehalten wird. Um festzustellen, zwischen welchen Zuständen signifikante Unterschiede in der Wahrnehmung von Auffälligkeiten vorliegen, erfolgt eine Analyse mittels paarweiser Wilcoxon-Tests. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.7 zusammengefasst. Der p-Wert ist bei vorliegender Signifikanz hervorgehoben.

Tabelle 5.7: p-Werte der paarweisen Wilcoxon-Tests mit Bonferroni-Korrektur ($\alpha = 0,05/3 = 0,0167$)

	30 Hz	15 Hz	statisch
30 Hz	1	6,10e-05	0,23
15 Hz		1	6,10e-05
statisch			1

Die Resultate der paarweisen Wilcoxon-Tests bestätigen das zu Beginn erwartete Verhalten. Zwischen *30 Hz* und *15 Hz* sowie zwischen *statisch* und *15 Hz* liegt ein signifikanter Unterschied vor, während zwischen *30 Hz* und *statisch* kein signifikanter Unterschied in der Wahrnehmung von Auffälligkeiten vorliegt. Das Störempfinden wurde über alle Probanden hinweg konsistent bewertet. *Zustand 2* wurde in jedem Fall als störend bewertet, während *Zustand 1* bei Wahrnehmung einer

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Auffälligkeit in keinem Fall als störend bewertet wurde. Die Ergebnisse bestätigen die Wirksamkeit der zeitlichen Modulation, projizierte Merkmale effektiv in der Abblendlichtverteilung nicht wahrnehmbar zu integrieren.

Zu jeder Messwiederholung wurden zusätzliche Informationen vermerkt, darunter Beschreibungen spezifischer Situationen oder weitere Bemerkungen durch die Probanden. Zwar zeigt die statistische Überprüfung keine signifikanten Unterschiede zwischen der hochfrequenten Ausgabe und der Serienlichtverteilung, dennoch soll eine nähere Betrachtung weitere Informationen liefern, um spezifische Ursachen für die Wahrnehmung der Auffälligkeiten zu ermitteln. Dadurch können Ausschlusskriterien definiert werden, unter denen die zeitlich modulierte Musterprojektion deaktiviert wird.

Gemäß Abbildung 5.17 erfolgte die Wahrnehmung von Auffälligkeiten bei der hochfrequenten Musterprojektion in elf von 120 Fällen. Tabelle 5.8 gibt einen Überblick über die Probanden, welche bei *Zustand 1* eine Auffälligkeit wahrgenommen haben. Gelistet sind lediglich Probanden und Messpunkte von *Zustand 1*, bei denen eine Auffälligkeit beobachtet wurde.

Tabelle 5.8: Darstellung der wahrgenommenen Auffälligkeiten bei Zustand 1 für Probanden, welche mindestens eine Auffälligkeit beobachtet haben

Messpunkt	9	10	16	17	20	22
Proband 1		1	1	1		
Proband 4		1				
Proband 7			1		1	
Proband 10					1	1
Proband 11					1	
Proband 12					1	
Proband 13					1	

Aus den Bemerkungen der Probanden sowie den situationsbedingten Notizen wurden folgende Ursachen identifiziert, die zu einer verstärkten Wahrnehmung von Auffälligkeiten (Flimmern) führten:

- mehrfaches Blinzeln
- schnelle Kopf-/Augenbewegungen
- Kennzeichen voraufsfahrender Fahrzeuge
- ruckartige, dynamische Fahrzeugbewegungen

Wie bereits in Kapitel 5.4.5 beschrieben, bestätigt die Studie das Auftreten temporärer Lichtartefakte, wie beispielsweise durch dynamische Einflüsse, welche zusätzlich durch hohe Leuchtdichten (Retroreflexion im Kennzeichen) verstärkt werden.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich somit Rahmenbedingungen für den gegebenen Anwendungsfall, unter welchen eine minimale Wahrnehmbarkeit erreicht wird. Für den Anwendungsfall kann somit eine Mindestdistanz zu voraufsfahrenden Fahrzeugen definiert werden, sodass die Projektion vollständig auf der Fahrbahn abgebildet wird. Zudem reduziert ein vorausschauender Fahrstil ruckartige Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs, wodurch negative Effekte reduziert werden. Weiter kann eine Maximalgeschwindigkeit definiert werden, um Nick- und Wankbewegungen zu reduzieren. Eine laterale Eingrenzung des Projektionsbereichs begünstigt aus subjektiver Be trachtung (vgl. Kapitel 5.3.2) die zeitliche Modulation zusätzlich, da kritische Randbereiche mit variabler Projektionsfläche ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse bestätigen die Anwendbarkeit der Methodik für Autobahnfahrten unter Rahmenbedingungen, welche das Verfahren begünstigen. Im Hinblick auf die Fehlstellungs detektion ist somit die

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN: WAHRNEHMUNG VON PROJEKTIONEN

Anwendung zeitlich modulierter Musterprojektionen unter den gegebenen Hardwareeinschränkungen realisierbar, sodass die Gesamtfunktion im Fahrbetrieb Anwendung finden kann.

Kapitel 6

FAZIT UND AUSBLICK

6.1 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit bestätigt das Potenzial, eine nicht wahrnehmbare Fehlstellungsdetektion lediglich unter Verwendung der integrierten Fahrzeug-Hardware zu realisieren. Die Fehlstellungsdetektion basiert auf einer initialen Brennpunktbestimmung gemäß des Ansatzes von Schneider [12]. Aufbauend darauf erfolgt die Fehlstellungsdetektion der Scheinwerfer durch einen Soll-Ist-Vergleich. Eine erforderliche Referenzlichtverteilung, welche im Rahmen der initialen Kalibrierung erfasst wird, dient als Vergleichswert für die aktuelle Scheinwerferpose und ist zwingend erforderlich. Im weiteren Verlauf ist somit die Verwendung eines SEP redundant.

Als Anwendungsfall kann hierbei der Einsatz im Kundendienst oder in einer Werkstatt genannt werden. Zu berücksichtigen sind die Rahmenbedingungen, welche bei der Aufnahme des Referenzbildes vorlagen, d.h. eine orthogonale Ausrichtung des Fahrzeugs vor der Projektionsfläche sowie ein identischer Abstand.

Der umgesetzte Algorithmus erreicht grundsätzlich die definierten Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit ($\Delta\varphi, \Delta\theta \leq 0,1^\circ$) in horizontaler und vertikaler Richtung, welche mittels einer SEP-Referenzmessung bestätigt wurde. Für die Fehlstellungsdetektion im statischen Fall vor einer Wand, beispielsweise im Kundendienst,

ist ein an die Projektionsebene befestigtes Schachbrettmuster erforderlich, um die Weltkoordinaten der projizierten Punkte anhand der Kameraeinheit ermitteln zu können. Die Umsetzung des Algorithmus basiert auf den im Fahrzeug verfügbaren Komponenten, weshalb keine zusätzliche Hardware benötigt wird.

Im weiteren Verlauf kann die Vorgehensweise auf den Kundenbetrieb übertragen werden, gemäß des Ansatzes nach Totzauer [10]. Hierbei fungiert als Projektionsfläche die Fahrbahn vor dem Fahrzeug, wodurch eine bekannte geometrische Beziehung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn vorausgesetzt ist. Entsprechend des statischen Falls ist eine Aufnahme der Lichtverteilung des initial kalibrierten Scheinwerfers notwendig. Anschließend kann die Fehlstellungsdetektion nach gleichem Muster erfolgen. Eine nähere Untersuchung für die Verwendung von Bodenprojektionen zur Ermittlung der Scheinwerferfehlstellung erfolgte im Rahmen dieser Arbeit nicht.

Zu berücksichtigen ist jedoch die optische Ausprägung der Projektionen, da sie für den Einsatz im öffentlichen Verkehrsbetrieb einer regelkonformen Darstellung entsprechen muss. Infolgedessen wurde ein Verfahren untersucht, um notwendige Charakteristika in der Lichtverteilung nicht wahrnehmbar zu integrieren. Zugleich erfordert die Fehlstellungsermittlung detektierbare Merkmale, welche durch die Kamera erfasst werden. Die Lösung des Zielkonflikts erfolgte anhand zeitlich modulierter Projektionen, da diese aufgrund der gegebenen Hardwareeinschränkungen das größte Potenzial liefern.

Zeitlich modulierte Projektionen können temporäre Lichtartefakte verursachen, weshalb eine Untersuchung unter Berücksichtigung diverser Einflussfaktoren erfolgte. Zugleich ist das Prinzip durch die gegebene Hardware eingeschränkt, wodurch eine Untersuchung im Grenzbereich zwischen der Wahrnehmbarkeit durch das Auge und der

HANDLUNGSEMPFEHLUNG

Detektierbarkeit durch die Kameraeinheit erforderlich wird. Die Untersuchungen erfolgten mittels Probandeninterviews und empirischen Beobachtungen unter kontrollierten und realen Bedingungen im statischen Fall sowie im dynamischen Fahrbetrieb. Aus den Untersuchungen resultieren Rahmenbedingungen, unter welchen die Methode die beste Eignung zeigt. Die auf einem Autobahnabschnitt durchgeführte Probandenstudie zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen der hochfrequenten Musterprojektion und der statischen Projektion der Serienlichtverteilung. Folglich bestätigt die Untersuchung die Eignung der zeitlich modulierten Projektion zur Integration nicht wahrnehmbarer Muster in die Abblendlichtverteilung für die gegebenen Komponenten.

Das Zusammenfügen der zwei Teilergebnisse (Fehlstellungsdetektion, zeitlich modulierte Projektionen) zu einem Gesamtsystem ermöglicht die Umsetzung einer nicht wahrnehmbaren Fehlstellungsdetektion im Fahrbetrieb. In Summe resultiert eine Weiterentwicklung der Ansätze von Schneider und Totzauer für eine integrierte Fehlstellungsdetektion durch die Anwendung der untersuchten Methodik für eine ECE-konforme, nicht wahrnehmbare Musterprojektion.

6.2 HANDLUNGSEMPFEHLUNG

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit gehen weitere offene Untersuchungsfelder hervor. Die Validierung der Fehlstellungsdetektion erfolgte im Rahmen dieser Arbeit lediglich unter Verwendung einer orthogonalen Projektionsfläche. Für den Einsatz im Fahrbetrieb ist eine zusätzliche Referenzmessung mittels Bodenprojektionen empfehlenswert, um die Genauigkeit für den Anwendungsfall zu belegen.

Dabei kann die Referenzmessung analog mit Hilfe eines SEP erfolgen.

Im weiteren Verlauf sollte ein robuster Bildverarbeitungsalgorismus implementiert werden, welcher die charakteristischen Merkmale im realen Verkehrsbetrieb zuverlässig erkennt. Unter Berücksichtigung der projektiv verzerrten Ausgabe auf der Fahrbahn können hierfür bereits existente Kanten- und Eckendetektoren fungieren. Zwar liegen bereits durch Totzauers [10] Untersuchungen Ergebnisse und Empfehlungen für die sog. dynamische Online-Kalibrierung vor, jedoch lediglich unter Verwendung eines einzelnen charakteristischen Merkmals im Nahbereich. Folglich ist eine Validierung unter Verwendung der Strukturlichtverteilung des vorliegenden Ansatzes zielführend. Zudem ist die Erkennbarkeit der Musterprojektionen durch die Kamera über verschiedene Fahrbahnbeläge zu untersuchen und sicherzustellen.

Die durchgeführte Probandenstudie erfolgte mit einem begrenzten Probandenkollektiv, aufgrund der Beschränkung für das Führen des Fahrzeugs im öffentlichen Verkehr, welche aus der Fahrzeugmodifizierung resultiert. Zwar zeigt das Resultat der Studie keinen signifikanten Unterschied zwischen der Serienlichtverteilung und der hochfrequenten Musterprojektion, jedoch würde ein größeres Kollektiv die statistische Aussagekraft erhöhen.

Die Fusion der einzelnen Teilbereiche, bestehend aus Fehlstellungsdetektion und zeitlich modulierter Projektionen, erfordert eine zeitliche Kopplung zwischen Projektionsmodul und akquirierender Kameraeinheit. Für die Erkennung der einzelnen Frames ist eine Synchronisierung zwischen projizierender und akquirierender Einheit zwingend erforderlich. Die Synchronisierung wurde im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe eines MATLAB-Skripts unter Verwendung der PTB-3 in Form einer Software-Synchronisierung realisiert und in ihrer Funktionalität

bestätigt. In der aktuellen Serienarchitektur ist keine Synchronisierung zwischen FAS-Kamera und Projektionsmodul realisiert, weshalb für die zukünftige Verwendung des Gesamtsystems die Anforderung definiert wird.

Die vorliegenden Untersuchungen erfolgten aufgrund der einschränkenden Hardwareeigenschaften im Grenzbereich der menschlichen visuellen Wahrnehmung. Projektionsmodule, welche eine Ausgabefrequenz deutlich über der CFF vorweisen, reduzieren das Auftreten von TLA und damit die Wahrnehmung von störenden Einflüssen. Somit begünstigt eine steigende Modulationsfrequenz die Anwendung der Methodik, wobei eine entsprechende Framerate der Kamera und die Synchronisierung des Gesamtsystems vorausgesetzt werden.

Die Generierung der Strukturlichtverteilung und damit der charakteristischen Merkmale erfolgte unter Verwendung der hochauflösenden DMD-Module. Aufgrund der geringen Komplexität der charakteristischen Merkmale, welche keine hohe Auflösung erfordern, ist eine Übertragung auf μ LED-Systeme realisierbar. μ LED-Systeme bieten eine ausreichend hohe Auflösung, um die verwendeten charakteristischen Merkmale abzubilden. [115] Zudem ermöglicht die Technologie höhere Kontraste, was die Merkmalserkennung durch die Kameraeinheit vereinfacht.

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist die Integration des Verfahrens in die bestehende Produktionskette. Da das System eine Referenzaufnahme nach einer initialen Kalibrierung erfordert, muss die Umsetzbarkeit in der Produktionslinie bewertet werden. Die Referenzpunkte können beispielsweise je Fahrzeugmodell einmalig definiert und im weiteren Verlauf zur Verfügung gestellt werden, jedoch wären in diesem Fall individuelle Toleranzen je Fahrzeug nicht berücksichtigt.

6.3 AUSBLICK

Die Untersuchungsergebnisse zeigen das Potenzial und die Praxistauglichkeit für die Anwendung nicht wahrnehmbarer Photogrammetrie im automobilen Umfeld. Gleichzeitig eröffnet sich durch das untersuchte Verfahren die Möglichkeit, bestehende Ansätze zu erweitern und neue Anwendungen zu implementieren.

Neben der Erweiterung des bestehenden Ansatzes von Totzauer zu einer nicht wahrnehmbaren Fehlstellungsdetektion der Scheinwerfer existieren weitere Anwendungsmöglichkeiten, in denen strukturiertes Licht im automobilen Bereich zum Einsatz kommt. Yargeldi [116] untersuchte im Rahmen seiner Dissertation, wie Scheinwerferprojektionen unter anderem basierend auf Umfeldinformationen stabilisiert werden können. Aufbauend auf einer initialen Kamera-Scheinwerfer-Kalibrierung können im weiteren Verlauf Tiefeninformationen gewonnen werden. Die Fahrbahnrekonstruktion vor dem Fahrzeug erfolgt mittels horizontaler Linienprojektionen und liefert Informationen für die Steuerung der Lichtverteilung.

Unter Verwendung der in der vorliegenden Arbeit untersuchten zeitlich modulierten Projektionen ist die umfeldbezogene Projektionsstabilisierung um die nicht wahrnehmbare Komponente erweiterbar, wodurch der Einsatz im öffentlichen Autobahnverkehr ermöglicht wird.

Ein weiterer Einsatz von strukturierten Projektionen zur Informationsgewinnung wird in der Arbeit von Krieff [117] beschrieben. Hierbei werden Linienmuster durch ein Scheinwerferprojektionsmodul generiert und mit Hilfe einer Kamereinheit ausgewertet, um eine Aussage über die Sichtweite bei Nebel zu erhalten. Unter Verwendung zeitlich modulierter Projektionen könnte das System nicht wahrnehmbar

realisiert werden, wobei die Reflexionseigenschaften von Nebel und daraus resultierende Lichtartefakte zu berücksichtigen und näher zu betrachten sind.

Das Prinzip zeitlich modulierter Projektionen ermöglicht die Umsetzung neuer lichtbasierter Funktionen. Als Beispiel hierfür kann die Erweiterung der Leuchtweitenregulierung genannt werden. Aktuelle Systeme regulieren die Leuchtweite basierend auf dem Nickwinkel des Fahrzeugs und reagieren somit auf die Fahrzeugdynamik. Durch die Verwendung von Umfeldinformationen, welche durch verborgene strukturierte Projektionen gewonnen werden, wäre die Umsetzung einer prädiktiven Leuchtweitenregulierung denkbar.

LITERATUR

- [1] B. Schlag, I. Petermann, G. Weller und C. Schulze, *Mehr Licht - mehr Sicht - mehr Sicherheit?: Zur Wirkung verbesserter Licht- und Sichtbedingungen auf das Fahrerverhalten* (Verkehrspychologie), 1. Aufl. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009, S. 119.
- [2] TÜV SÜD, *Die häufigsten Mängel laut TÜV-Report*, 2024. Adresse: <https://www.tuvsud.com/de-de/publikationen/tuev-report/die-haeufigsten-maengel> (besucht am 14.12.2024).
- [3] ADAC, *TÜV-Report 2025: Jahresvergleich - keine Verbesserung*, 2024. Adresse: <https://www.adac.de/news/tuev-report-2025/> (besucht am 14.12.2024).
- [4] Zentralverband Deutsches Kfz-Gewerbe (ZDK), *Licht-Test 2024: Jeder vierte Pkw hat Mängel*, 2024. Adresse: <https://www.kfzgewerbe.de/licht-test-2024-jeder-vierte-pkw-hat-maengel> (besucht am 14.12.2024).
- [5] S. Berlitz, C. Funk, R. Horst und A. Rosenow, „ASSISTENZSYSTEME ZUR VERBESSERUNG DER SICHT BEI TAG UND NACHT,“ *ATZextra*, Jg. 15, Nr. 11, S. 192–197, 2010.
- [6] AUDI AG, *Wie Audi mit der Digitalisierung des Lichts den Weg in die Zukunft weist*, 2022. Adresse: <https://www.audi-mediacenter.com/de/pressemitteilungen/wie-audi-mit-der-digitalisierung-des-lichts-den-weg-in-die-zukunft-weist-14624> (besucht am 08.10.2024).
- [7] C. Hinterwälder, *Analyse der Einstellgenauigkeit von Kfz-Scheinwerfern und Identifizierung von Ursachen der Verlagerungen des Scheinwerfer-Lichtbilds*, Technische Universität Darmstadt, 2019.

LITERATUR

- [8] *Regelung Nr. 48 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen [2016/1723]*. Amtsblatt der Europäischen Union; L 265/125, Brüssel, 2016.
- [9] *Regelung Nr. 112 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer mit Glühlampen für asymmetrisches Abblendlicht oder Fernlicht oder für beides*, Amtsblatt der Europäischen Union; L 265/125, Brüssel, 2005.
- [10] A. Totzauer, „Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht,“ Diss., Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [11] S. Söhner, „Entwicklung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation,“ Diss., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015.
- [12] C. Schneider, „Entwicklung eines tiefenwahrnehmenden Scheinwerfer-Kamera-Systems,“ Diss., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2019, 220 S.
- [13] K. Reif, *Grundlagen Fahrzeug- und Motorentechnik*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2017, Bd. 1.
- [14] AUDI AG, *Digitaler Matrix LED-Scheinwerfer*, 2022. Adresse: <https://www.audi-mediacenter.com/de/fotos/detail/audi-a8-107770> (besucht am 08.10.2024).
- [15] E.-O. Rosenhahn, U. Schlöder und I. Rutkiewicz, „HD-Lichtfunktionen in Scheinwerfern zur Verbesserung der Verkehrssicherheit,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jg. 123, Nr. 11, S. 46–51, 2021.

- [16] M. Rosenauer, C. Gärditz und O. Hering, *Wie Licht Fahrzeugdesign und Funktionen verändern wird*, Elektronikpraxis, 2024. Adresse: <https://www.elektronikpraxis.de/wie-licht-fahrzeugdesign-und-funktionen-veraendern-wird-a-57480f1629151e1f2442040312836907/> (besucht am 22.12.2024).
- [17] D. Kunde, *Luxus, Individualität und Information*, Automobil Industrie, 2024. Adresse: <https://www.automobil-industrie.vogel.de/lichttechnik-zkw-hella-bmw-audi-a-a7612ecdcd95b8d0aa6c652e8c660309/>.
- [18] R. Kauschke, K. Eichhorn und J. Wallaschek, „Aktive Scheinwerfer zur subtraktiven Lichtverteilungserzeugung,“ 2004.
- [19] AUDI AG, *Digitaler Matrix LED-Scheinwerfer*, 2022. Adresse: <https://www.audi-mediacenter.com/de/fotos/detail/audi-a8-107772> (besucht am 08.10.2024).
- [20] Texas Instruments, *DLP5531-Q1 0.55-Inch 1.3-Megapixel DMD for Automotive Exterior Lighting*, TJA1043, Mai 2019. Adresse: <https://www.ti.com/lit/gpn/dlp5531-q1>.
- [21] AUDI AG, *Digitale Matrix LED-Scheinwerfer: Funktionen*, <https://www.audi-mediacenter.com/de/fotos/detail/digitale-matrix-led-scheinwerfer-97445>, 2020. (besucht am 08.10.2024).
- [22] Robert Bosch GmbH, Hrsg., *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Springer Fachmedien, 2024.
- [23] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *HU-Scheinwerfer-Prüfrichtlinie (Nr. 44): Richtlinie für die Überprüfung der Einstellung der Scheinwerfer von Kraftfahrzeugen bei der Hauptuntersuchung nach § 29*, 2014.

- [24] *Road vehicles — Measurement equipment for orientation of headlamp luminous beams*, International Organization for Standardization, 1993.
- [25] R. Arifi, M. Helmer und C. Neumann, „Anforderungen an eine Scheinwerferkalibrierung für hochauflösende Systeme,“ 9. VDI-Fachtagung: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik 2022 ; Karlsruhe, 30. Juni und 01. Juli 2022*, (Karlsruhe, Deutschland, 30. Juni–1. Juli 2022), Bd. 2400, 2022, S. 55–66.
- [26] T. Luhmann, *Nahbereichsphotogrammetrie*, 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wichmann, 2023.
- [27] M. Sackewitz, Hrsg., *Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik (Vision-Leitfaden)*. Fraunhofer-Verl., 2014, Bd. 14.
- [28] B. Jähne, *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*, 7., neu bearb. Aufl. Springer Vieweg, 2012, XV, 711 S.
- [29] R. Hartley und A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2. Aufl. Cambridge University Press, 2004.
- [30] W. Förstner und B. Wrobel, *Photogrammetric Computer Vision: Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction (Geometry and Computing)*. Springer International Publishing, 2018.
- [31] H. Süße und E. Rodner, *Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin*. Springer Vieweg, 2014.
- [32] Y. Ma, S. Soatto, J. Kosecka und S. Sastry, *An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models (Interdisciplinary Applied Mathematics)*. Springer New York, 2005.
- [33] S. Rahmann und H. Burkhardt, *Praktikumsversuch Kamerakalibrierung*, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- [34] F. Remondino und C. Fraser, „Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons,“ *Ine. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, Jg. 36, 2005.

- [35] Z. Zhang, „A Flexible New Technique for Camera Calibration.,“ *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Jg. 22, S. 1330–1334, 2000.
- [36] K. Ikeuchi, Y. Matsushita, R. Sagawa u. a., „Structured Light,“ in *Active Lighting and Its Application for Computer Vision: 40 Years of History of Active Lighting Techniques*. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 125–155. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-030-56577-0_6.
- [37] B. Han, S. Yang und S. Chen, „Reasearch on comparison and analysis of the projector calibration,“ *2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, 2019, S. 768–772.
- [38] D. Moreno und G. Taubin, „Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration,“ *2012 Second International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission (3DIMPVT 2012)*, 2012, S. 464–471.
- [39] O. Fleischmann und R. Koch, „Fast projector-camera calibration for interactive projection mapping,“ *2016 23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2016, S. 3798–3803.
- [40] B. Huang, Y. Tang, S. Ozdemir und H. Ling, „A Fast and Flexible Projector-Camera Calibration System,“ *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Jg. 18, Nr. 3, S. 1049–1063, 2021.
- [41] T. Okatani und K. Deguchi, „Autocalibration of a projector-camera system,“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Jg. 27, Nr. 12, S. 1845–1855, 2005.
- [42] W. Li, Y. Zhong, T. Liu und M. Tai, „Efficient and accurate projector calibration method based on phase-shifting method with sinusoidal structured light,“ *Heliyon*, Jg. 9, Nr. 4, e15067, 2023.

- [43] X.-Q. Yin, M.-J. Ren und L.-M. Zhu, „A single-pose series sphere-based calibration method for camera-projector structured light system,” *Optics Communications*, Jg. 507, S. 127 659, 2022.
- [44] S. Yamazaki, M. Mochimaru und T. Kanade, „Simultaneous self-calibration of a projector and a camera using structured light,” *2011 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition workshops (CVPRW 2011)*, 2011, S. 60–67.
- [45] M. Kimura, M. Mochimaru und T. Kanade, „Projector Calibration using Arbitrary Planes and Calibrated Camera,” *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007, S. 1–2.
- [46] R. Furukawa und H. Kawasaki, „Uncalibrated Multiple Image Stereo System with Arbitrarily Movable Camera and Projector for Wide Range Scanning,” *Proceedings / Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 3DIM 2005*, 2005, S. 302–309.
- [47] G. Falcao, N. Hurtos und J. Massich, „Plane-based calibration of a projector-camera system,” *VIBOT Master*, Jg. 9, 2008.
- [48] J. Salvi, X. Armangué und J. Batlle, „A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation,” *Pattern Recognition*, Jg. 35, Nr. 7, S. 1617–1635, 2002.
- [49] M. Eckert, *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Strassenverkehr*. Verlag Technik, 1993.
- [50] S. Kokoschka, *Grundlagen der Lichttechnik*, Karlsruhe: Lichttechnisches Institut, 2003.
- [51] S. Hecht, *The Visual Discrimination of Intensity and the Weber-Fechner Law*. Waverly Press, 1924.

- [52] P. Sprenger, „Visuelle Wahrnehmung und visuelle Aufmerksamkeit,“ *Prozesse bei der strukturierenden Mengenwahrnehmung und strukturnutzenden Anzahlbestimmung von Kindern im Elementarbereich: Eine Eye-Tracking Studie*, S. 51–83, 2021.
- [53] U. Schmidt, *Professionelle Videotechnik: Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotechnik in SD, HD, DI, 3D* (SpringerLink : Bücher). Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [54] D. H. Kelly, „Theory of Flicker and Transient Responses, I. Uniform Fields,“ *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 61, Nr. 4, S. 537–546, 1971.
- [55] D. H. Kelly, „Visual Responses to Time-Dependent Stimuli. * I. Amplitude Sensitivity Measurements†,“ *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 51, Nr. 4, S. 422–429, 1961.
- [56] D. Polin, „Flimmereffekte von pulsweiten-modulierter LED-Beleuchtung,“ de, Diss., Technische Universität Darmstadt, Juli 2015. Adresse: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4664/>.
- [57] T. Groneberg, „Die Flimmerverschmelzungsfrequenz bei altersabhängiger Makuladegeneration,“ Diss., Technische Universität München (TUM), Sep. 2010.
- [58] Bundesamt für Strahlenschutz, *Lichtflimmern und Stroboskop-effekte – allgemein: Temporal Light Artefacts (TLA)*, 2024. Adresse: <https://www.bfs.de/DE/themen/opt/sichtbares-licht/wirkung/lichtflimmern-tla/lichtflimmern-tla.html> (besucht am 16. 10. 2024).
- [59] C. W. Tyler und R. D. Hamer, „Analysis of visual modulation sensitivity. IV. Validity of the Ferry–Porter law,“ *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 7, Nr. 4, S. 743–758, 1990.

- [60] Lichtnet, „Temporäre Lichtartefakte: Grundlagen, Messverfahren und Messergebnisse von LED-Treibern aus der Industrie,“ *LICHT*, Jg. 5, 2021. (besucht am 16. 10. 2024).
- [61] CIE Technical Committee, „Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models,“ Commission Internationale de l’Éclairage (CIE), 2016.
- [62] J. Lindén und C. Dam-Hansen, *Flicker explained: interpretation of the Technical Report IEC 61547*. Lund University, Lund Institute of Technology, 2022.
- [63] M. Thom, S. Hahn, W. Ritter und J. Gloger, „Method for adjusting and/or calibrating headlight of motor vehicle, involves comparing determined global position at bright-dark-limit with reference position, and calibrating and/or adjusting headlight with determined deviation,“ DE102010048689 (A1), Publisher: DAIMLER AG, 2011.
- [64] A. Totzauer, „Verfahren und Scheinwerferanlage zum Ausgleich von Ausrichtfehlern eines Scheinwerfers,“ DE102012007908 (A1), Publisher: AUDI AG, 2013.
- [65] C. Schneider, S. Söhner, C. Haas, T. Kunz und S. Saralajew, „Verfahren zum Feststellen einer Lagebeziehung zwischen einer Kamera und einem Scheinwerfer eines Fahrzeugs,“ DE102017124955 (A1), Publisher: PORSCHE AG, 2019.
- [66] J. Frimberger, A. Hosemann, T. Riesenweber und C. Unger, „Verfahren zur automatischen Scheinwerferkalibrierung eines Kraftfahrzeugs,“ DE102017214950 (A1), Publisher: BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG, 2019.
- [67] B. Dreier, „Method and advice for adjusting a basic setting of the headlamp of a motor vehicle,“ EP2485032 (A2), Publisher: AUTOMOTIVE LIGHTING REUTLINGEN, 2012.

- [68] A. Taner, A. Totzauer und B. Hummel, „Method for calibrating a vehicle system managing at least one headlamp on a motor vehicle,“ EP2416139 (A1), Publisher: AUDI AG and AUDI ELECTRONICS VENTURE GMBH, 2012.
- [69] C. Schmidt und I. Hoffmann, „Verfahren und Vorrichtung zur Überprüfung eines lichttechnischen Fahrassistenzsystems,“ DE102010049047 (A1), Publisher: HELLA KGAA HUECK & CO, 2012.
- [70] C. Schneider, T. Kunz und S. Söhner, „Automatisierte Erkennung einer Scheinwerferfehlstellung,“ DE102017117594 (A1), Publisher: PORSCHE AG, 2019.
- [71] R. Goedecker und C. Wilks, „Method for adjusting light device e.g. headlight of motor car, involves acquiring light distribution outside of light device using camera, and detecting features of light-dark boundaries on measuring wall,“ DE102012102446 (A1), Publisher: HELLA KGAA HUECK & CO, 2013.
- [72] S. Söhner, T. Schaal und M. A. La, „Leuchtsystem für ein Kraftfahrzeug sowie Verfahren zur Justage einer Lichteinheit eines derartigen Leuchtsystems,“ DE102013111645 (A1), Publisher: PORSCHE AG, 2015.
- [73] S. Söhner und T. Schaal, „Leuchtsystem für ein Kraftfahrzeug sowie Verfahren zur Justage einer Lichteinheit eines Leuchtsystems,“ DE102014102757 (A1), Publisher: PORSCHE AG, 2015.
- [74] W. Mehr, T. Fechner und S. Heinrich, „Method for detecting misalignment of a vehicle headlight using a camera,“ WO2010000214 (A1), Publisher: ADC AUTOMOTIVE DIST CONTROL and MEHR WILFRIED and FECHNER THOMAS and HEINRICH STEFAN, 2010.
- [75] S. Eberhardt, „Method for adjusting the aiming of vehicle headlamps,“ EP1757485 (A1), Publisher: PORSCHE AG, 2007.

- [76] B. Schneider, „Verfahren zur Überprüfung der Einstellung von Scheinwerfern,“ DE102020000292 (A1), Publisher: DAIMLER AG, 2020.
- [77] B. Woltermann, „Method for calibrating and adjusting lighting unit of vehicle, involves accomplishing coarse adjustment or micro-adjustment of picture version unit or lighting unit,“ DE102010046517 (A1), Publisher: DAIMLER AG, 2011.
- [78] A. Striegler, „Verfahren zum Überprüfen der Einstellung eines Scheinwerfers in einem Kraftfahrzeug,“ DE102013211876 (A1), Publisher: BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG, 2014.
- [79] H. Eggers, J. D. I. Gloger, S. D. I. Hahn u. a., „Verfahren zum Justieren und/oder Kalibrieren zumindest eines Scheinwerfers eines Fahrzeugs,“ DE102011109440 (A1), Publisher: DAIMLER AG, 2012.
- [80] S. Berlitz und B. Hummel, „Verfahren zur automatischen Justage einer Lichteinheit eines Fahrzeugs und Leuchtsystem für ein Fahrzeug,“ DE102007049619 (A1), Publisher: AUDI AG, 2009.
- [81] I. Hoffmann, „Verfahren zur Kalibrierung zumindest eines Scheinwerfers,“ DE102013201876 (A1), Publisher: HELLA KGAA HUECK & CO, 2014.
- [82] B. Kubitz, „Verfahren zur Scheinwerferjustage,“ DE1020141178 44 (A1), Publisher: HELLA KGAA HUECK & CO, 2014.
- [83] X. Maurice, C. Albitar, C. Doignon und M. de Mathelin, „A structured light-based laparoscope with real-time organs' surface reconstruction for minimally invasive surgery,“ 2012, S. 5769–5772.
- [84] A. Reiter, A. Sigaras, D. Fowler und P. K. Allen, „Surgical Structured Light for 3D minimally invasive surgical imaging,“ 2014, S. 1282–1287.

- [85] M. J. Thali, M. Braun und R. Dirnhofer, „Optical 3D surface digitizing in forensic medicine: 3D documentation of skin and bone injuries,“ *Forensic Science International*, Jg. 137, Nr. 2, S. 203–208, 2003.
- [86] C. Schmalz, F. Forster, A. Schick und E. Angelopoulou, „An endoscopic 3D scanner based on structured light,“ *Medical Image Analysis*, Jg. 16, Nr. 5, S. 1063–1072, 2012.
- [87] W. Brüschweiler, M. Braun, R. Dirnhofer und M. Thali, „Analysis of patterned injuries and injury-causing instruments with forensic 3D/CAD supported photogrammetry (FPHG): an instruction manual for the documentation process,“ *Forensic Science International*, Jg. 132, Nr. 2, S. 130–138, 2003.
- [88] L.-S. Bieri und J. Jacot, „Three-dimensional vision using structured light applied to quality control in production line,“ W. Osten und M. Takeda, Hrsg., International Society for Optics und Photonics, Bd. 5457, 2004, S. 463–471.
- [89] J. A. Jalkio, R. C. Kim und S. K. Case, „Three dimensional inspection using multistripe structured light,“ *Optical Engineering*, Jg. 24, S. 246 966, 1985.
- [90] W. Zhen-zhong, Z. Guangjun und L. Xin, „The application of machine vision in inspecting position-control accuracy of motor control systems,“ *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501)*, Jg. 2, 787–790 vol.2, 2001.
- [91] S. H. Wang, C. J. Tay, C. Quan, H. M. Shang und Z. F. Zhou, „Laser integrated measurement of surface roughness and micro-displacement,“ *Measurement Science and Technology*, Jg. 11, Nr. 5, S. 454, 2000.

- [92] R. Sitnik, J. Krzeslowski und G. Mączkowski, „Archiving shape and appearance of cultural heritage objects using structured light projection and multispectral imaging,” *Optical Engineering*, Jg. 51, S. 1115–, 2012.
 - [93] S. Qiu, C. Cao, B. Zhang u.a., „Feasibility study of remote sensing using structured light for 3D damage assessments after natural disasters,” *Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques and Applications V*, A. M. Larar, M. Suzuki und J. Wang, Hrsg., International Society for Optics und Photonics, Bd. 9263, 2014, 92632R.
 - [94] AUDI AG, *Audi A8*, 2022. Adresse: <https://www.audi-mediacenter.com/de/fotos/detail/audi-a8-107752> (besucht am 23.10.2024).
 - [95] AUDI AG, *Audi Intern.*
 - [96] Baumer Holding AG, *Industriekameras / LX-Serie VLXT-126C.I.* Adresse: <https://www.baumer.com/de/de/p/44514> (besucht am 24.10.2024).
 - [97] Baumer Holding AG, *ZVL-V1228-MPY*. Adresse: <https://www.baumer.com/de/de/p/35622> (besucht am 24.10.2024).
 - [98] The MathWorks Inc., *Computer Vision Toolbox version: 23.2 (R2023b)*, Natick, Massachusetts, United States, 2023. Adresse: <https://www.mathworks.com>.
 - [99] G. Bradski und A. Kaehler, *OpenCV: Open Source Computer Vision Library*, 2000. Adresse: <https://opencv.org/>.
 - [100] I. T. Jolliffe, *Principal Component Analysis* (Springer Series in Statistics), 2nd. Springer, 2002.
 - [101] AUDI AG, *Nachtsichtassistent - Audi Technology Portal*. Adresse: <https://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/fahrerassistenzsysteme/nachtsichtassistent>.
-

- [102] A. Ehrmann und T. Błachowicz, „Das menschliche Auge,“ *Physik in unserer Zeit*, Jg. 46, Nr. 3, S. 136–139, 2015.
- [103] T. C. Breiner, „Physiologie des Auges,“ in *Farb- und Formpsychologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 9–30. Adresse: https://doi.org/10.1007/978-3-662-57870-4_2.
- [104] B. A. Wandell, *Foundations of vision*. Sinauer Associates, 1995.
- [105] C. Schierz, „Schnelle zeitliche Lichtmodulationen: Zum technischen Stand der Flimmerbewertung,“ *Licht 2021: Ilmenau*, 21. bis 24. März 2021 ; 24. Gemeinschaftstagung, S. 100–109, 2021.
- [106] P. Jahn, „Bewertungsmodell zur Evaluation hochauflösender, lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme,“ Diss., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020, 240 S.
- [107] F. König, *Verbergen projizierter Merkmale in der Abblendlichtverteilung für eine nicht wahrnehmbare Tiefenbestimmung*, Technische Hochule Ingolstadt, 2023.
- [108] DATatab Team. „DATatab: Online Statistics Calculator,“ DATatab e.U. (2024), Adresse: <https://datatab.de/> (besucht am 27. 11. 2024).
- [109] Universität Zürich, *Datenanalyse mit SPS - Friedman-Test*, https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse-spss/_unterschiede/zentral/friedman.html. (besucht am 18. 11. 2024).
- [110] R. Stublla, *Untersuchung zeitlich modulierter Projektionen in der Abblendlichtverteilung von PKW im dynamischen Fahrbetrieb*, Technische Hochule Ingolstadt, 2024.
- [111] Google, *Google Maps*, <https://www.google.com/maps>, 2024.

LITERATUR

- [112] Bundesrepublik Deutschland, *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO)*, § 3 *Geschwindigkeit*, 2024. Adresse: https://www.gesetze-im-internet.de/stvo/_3.html (besucht am 05.12.2024).
- [113] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, „Richtlinien für die Anlage von Autobahnen,” Technische Regelwerke, FGSV, Köln, 2008.
- [114] M. Kleiner, D. Brainard, D. Pelli, C. Broussard, T. Wolf und D. Niehorster, *Psychtoolbox-3*, 2024. Adresse: <http://psychtoolbox.org>.
- [115] ams-OSRAM AG, *EVIYOS® for automotive & mobility applications*, url<https://ams-osram.com/de/products/product-families/eviyos>, 2024. (besucht am 11.12.2024).
- [116] S. Yargeldi, „Umfeldbezogene Stabilisierung von Fahrzeugscheinwerferprojektionen,” Diss., Eberhard Karls Universität Tübingen, 2024.
- [117] F. Krieft, „Erfassung der Sichtweite bei Nebel durch die Kombination aus hochauflösendem Scheinwerfer und einem Kamerasystem,” Diss., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2023, 244 S.

EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN

- R. Arifi, M. Helmer und C. Neumann, „Anforderungen an eine Scheinwerferkalibrierung für hochauflösende Systeme,“ 9. VDI-Fachtagung: *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik 2022*; Karlsruhe, 30. Juni und 01. Juli 2022, (Karlsruhe, Deutschland, 30. Juni–1. Juli 2022), Bd. 2400, 2022, S. 55–66.

BETREUTE ARBEITEN

- I. Wrzeska, *Untersuchung der Wahrnehmung von Inhomogenitäten in der Abblendlichtverteilung mithilfe einer Studie*, Technische Hochule Ingolstadt, 2022.
- F. König, *Verbergen projizierter Merkmale in der Abblendlichtverteilung für eine nicht wahrnehmbare Tiefenbestimmung*, Technische Hochule Ingolstadt, 2023.
- J. Reich, *Entwicklung und Validierung einer Kalibriermethode für hochauflösende Scheinwerfer*, Leibniz Universität Hannover, 2024.
- R. Stublla, *Untersuchung zeitlich modulierter Projektionen in der Abblendlichtverteilung von PKW im dynamischen Fahrbetrieb*, Technische Hochule Ingolstadt, 2024.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1:	Aufbau des digitalen Matrix LED-Scheinwerfer	6
Abbildung 2.2:	Aufbau des DML-Moduls	7
Abbildung 2.3:	DML-basierte Lichtfunktionen	9
Abbildung 2.4:	Der photogrammetrische Prozess	12
Abbildung 2.5:	Prozesskette: Bildaufnahme	13
Abbildung 2.6:	Prinzip der Triangulation	15
Abbildung 2.7:	Modell der Lochkamera	17
Abbildung 2.8:	Weber-Fechner-Kurve	20
Abbildung 2.9:	CSF: Kontrastempfinden und Ortsfrequenz	22
Abbildung 2.10:	Stroboskopoeffekt (links) und Geisterbild (rechts)	25
Abbildung 3.1:	Aufbau des Versuchsträgers	32
Abbildung 3.2:	Zusammensetzung der Gesamtlichtverteilung für einen Audi e-tron	33
Abbildung 3.3:	Koordinatensysteme der Komponenten . .	37
Abbildung 3.4:	Vereinfachte Darstellung des Lochkameramodells	38
Abbildung 3.5:	Schematischer Ablauf zur Ermittlung der Scheinwerferfehlstellung	39
Abbildung 3.6:	Darstellung der Projektionsfläche mit zwei Weltpunkten	42
Abbildung 3.7:	Ablauf zur Ermittlung der 3D-Koordinaten aus 2D-Bildkoordinaten	44
Abbildung 3.8:	Brennpunktermittlung auf Basis linear verlaufender Strahlen	46

Abbildung 3.9:	Fehlstellungsermittlung durch einen Soll-Ist-Vergleich beispielhaft an einem Messpunkt dargestellt	49
Abbildung 3.10:	Versuchsaufbau für die Referenzmessung mittels SEP	51
Abbildung 3.11:	Messpositionen zur Validierung des Algorithmus	51
Abbildung 3.12:	Überlagerung der Positionen 1 (rot) & 3 (grün) der Strukturlichtverteilung in der ersten Distanz	53
Abbildung 3.13:	Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 3	54
Abbildung 3.14:	Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 4	55
Abbildung 4.1:	Verschiebung der Kontrastsensitivitätskurve bei unterschiedlicher Adaptation des Auges ($9 \cdot 10^{-4}$ Troland – $9 \cdot 10^2$ Troland)	68
Abbildung 4.2:	Schnelle, zeitliche Abfolge zweier komplementärer Projektionen zur Erzeugung der Gesamtlichtverteilung	70
Abbildung 4.3:	CFF in Abhängigkeit der Adaptationsleuchtdichte und der Modulationstiefe	71
Abbildung 5.1:	Schachbrettprojektion in der Abblendlichtverteilung als charakteristisches Muster	77

Abbildung 5.2:	Generierung der Abblendlichtverteilung mit Hilfe vorgegebener Graustufenbilder für das linke und rechte Projektionsmodul	78
Abbildung 5.3:	Beispielhafte Darstellung der zeitlichen Modulation mit maximaler Modulationstiefe für den ursprünglichen Pixelwert	79
Abbildung 5.4:	Maximale Belichtungszeit der Kamera	81
Abbildung 5.5:	Generierung der modulierten Einzelbilder durch Überlagerung eines Schachbrettmusters und dessen Komplement mit dem Ausgangsbild bei definierten Ortsfrequenzen (hier beispielhaft 0,57 cpd, 40 % Modulationstiefe)	84
Abbildung 5.6:	Modifizierte Abblendlichtverteilungen mit einer Ortsfrequenz von je 2 cpd, bei unterschiedlichen Modulationstiefen (links: 30 %, rechts: 40 %) und Distanzen (links: 35 m, rechts: 25 m)	87
Abbildung 5.7:	Demographische Auswertung der teilnehmenden Probanden in Form eines Sankey-Diagramms, erstellt mit DATatab	91
Abbildung 5.8:	Box-Whisker-Plot: Bewertung der Sichtbarkeit des Schachbretts für alle Parameterkombinationen der Modulationstiefe und Distanz beginnend mit Modulationstiefe 1 = 40 %, Distanz 1 = 25 m	92
Abbildung 5.9:	Box-Whisker-Plot: Bewertung der Flimmerwahrnehmung für alle Parameterkombinationen der Modulationstiefe und Distanz beginnend mit Modulationstiefe 1 = 40 %, Distanz 1 = 25 m	92

Abbildung 5.10:	Leuchtdichteaufnahme des projizierten Musters in logarithmischer Darstellung	97
Abbildung 5.11:	Leuchtdichteaufnahme des projizierten Musters in logarithmischer Darstellung	98
Abbildung 5.12:	Leuchtdichteaufnahme des projizierten Musters in logarithmischer Darstellung. Die hervorgehobenen Bereiche stellen die Regionen mit höchster Modulationstiefe dar.	99
Abbildung 5.13:	Strecke zur Bewertung der Flimmerwahrnehmung unter realen Umgebungsbedingungen	101
Abbildung 5.14:	Modifizierte Abblendlichtverteilungen mit den Ortsfrequenzen 1,29 cpd horizontal, 2 cpd vertikal, bei maximaler Modulationstiefe je Pixel	107
Abbildung 5.15:	Festgelegte Versuchsstrecke zur Bewertung der Methodik durch die Probanden	109
Abbildung 5.16:	Demographische Auswertung der teilnehmenden Probanden in Form eines Sankey-Diagramms, erstellt mit DATAtab [108]	116
Abbildung 5.17:	Absolute Darstellung: Auftreten von Auffälligkeiten für alle Zustände	117
Abbildung 5.18:	Box-Whisker-Plot: Auftreten von Auffälligkeiten für alle Zustände	117
Abbildung A.1:	Definierte Verstellung der Strukturlichtverteilung in Distanz 1	160
Abbildung A.2:	Definierte Verstellung der Strukturlichtverteilung in Distanz 2	161

Abbildung A.3:	Definierte Verstellung der Strukturlichtverteilung in Distanz 3	162
Abbildung A.4:	Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 2	164
Abbildung A.5:	Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 3	165
Abbildung A.6:	Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 4	166
Abbildung A.7:	Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 5	167
Abbildung A.8:	Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 6	168
Abbildung A.9:	Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 7	169
Abbildung A.10:	Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 8	170
Abbildung A.11:	Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 9	171
Abbildung A.12:	Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 2	172

Abbildung A.13: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 3	173
Abbildung A.14: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 4	174
Abbildung A.15: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 5	175
Abbildung A.16: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 6	176
Abbildung A.17: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 7	177
Abbildung A.18: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 8	178
Abbildung A.19: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 9	179
Abbildung A.20: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 2	180
Abbildung A.21: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 3	181
Abbildung A.22: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 4	182

Abbildung A.23: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 5	183
Abbildung A.24: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 6	184
Abbildung A.25: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 7	185
Abbildung A.26: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 8	186
Abbildung A.27: Verteilung der Fehlstellungen [°] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 9	187

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1: Auswertung der Fehlstellungsdetektion für Distanz 1	56
Tabelle 3.2: Auswertung der Fehlstellungsdetektion für Distanz 2	57
Tabelle 3.3: Auswertung der Fehlstellungsdetektion für Distanz 3	58
Tabelle 5.1: Darstellbare Linienpaare (lp) bzw. Ortsfrequenzen (cpd) aufgrund der Diskretisierung in horizontaler und vertikaler Richtung unter Berücksichtigung des gesamten FOV	83
Tabelle 5.2: Likert-Skala zur Bewertung der Aussagen	88
Tabelle 5.3: Flimmerbewertung für alle Zustände, wobei gilt Zustand 1 = Kontrast 1, Distanz 1; „Trifft überhaupt nicht zu“ = 1 ... „Trifft voll zu“ = 4	93
Tabelle 5.4: Rangzuordnung im Rahmen des Friedman-Test	94
Tabelle 5.5: Statistische Kennzahlen der aufgetretenen Auffälligkeiten für alle drei Zustände	118
Tabelle 5.6: Ergebnisse des Friedman-Tests für die Bewertung der Nullhypothese	119
Tabelle 5.7: p-Werte der paarweisen Wilcoxon-Tests mit Bonferroni-Korrektur ($\alpha = 0,05/3 = 0,0167$) .	119
Tabelle 5.8: Darstellung der wahrgenommenen Auffälligkeiten bei Zustand 1 für Probanden, welche mindestens eine Auffälligkeit beobachtet haben	120

Anhang A

REFERENZMESSUNG

A.1 AUFNAHMEN DER FEHLSTELLUNGEN

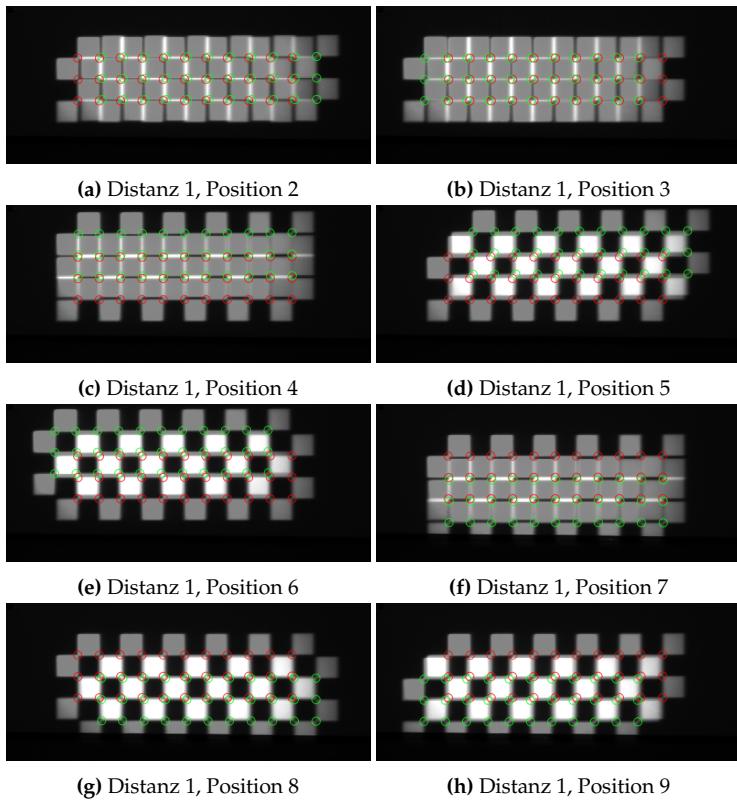


Abbildung A.1: Definierte Verstellung der Strukturlichtverteilung in Distanz 1

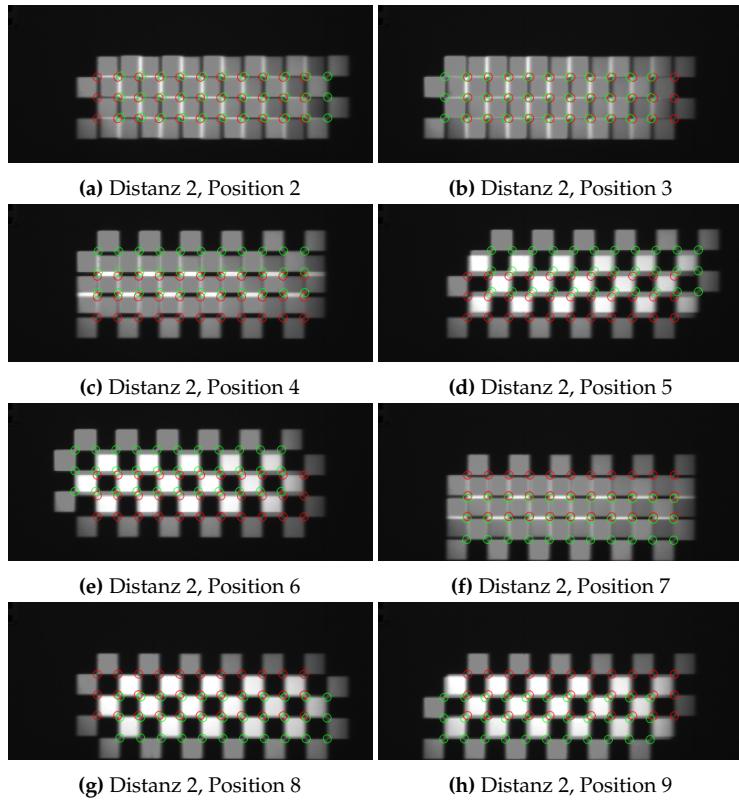


Abbildung A.2: Definierte Verstellung der Strukturlichtverteilung in Distanz 2

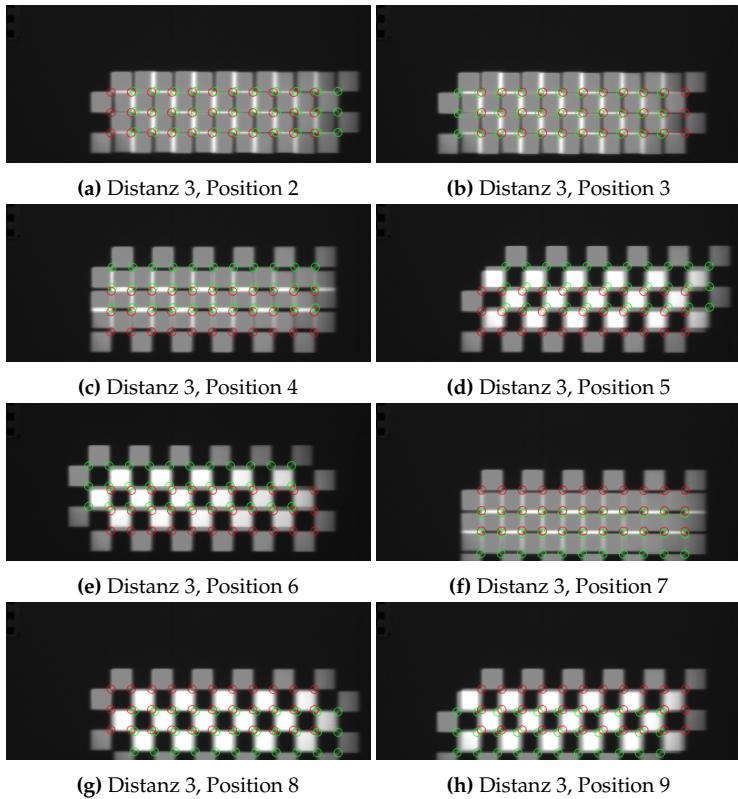


Abbildung A.3: Definierte Verstellung der Strukturlichtverteilung in Distanz 3

A.2 AUSWERTUNG: FEHLSTELLUNGSDETEKTION

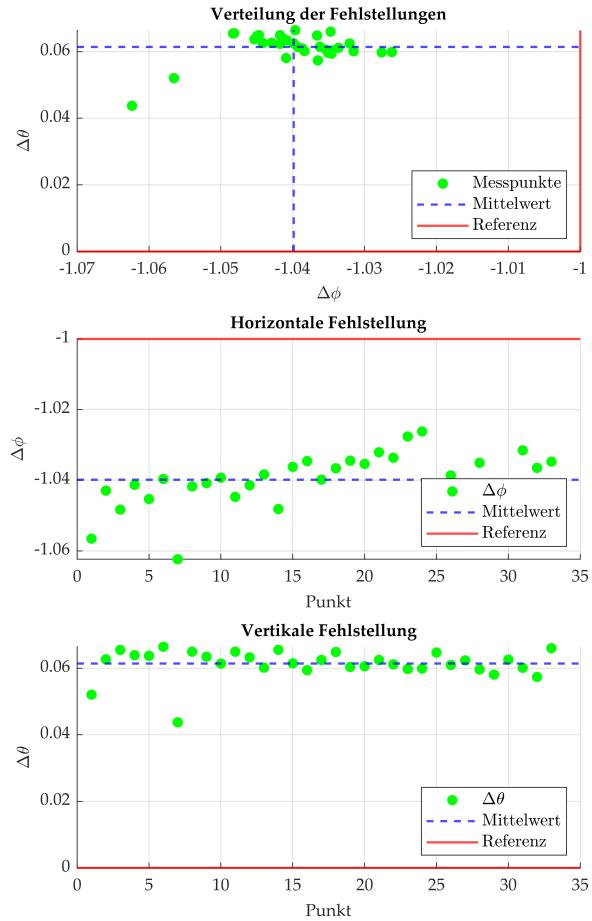


Abbildung A.4: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 2

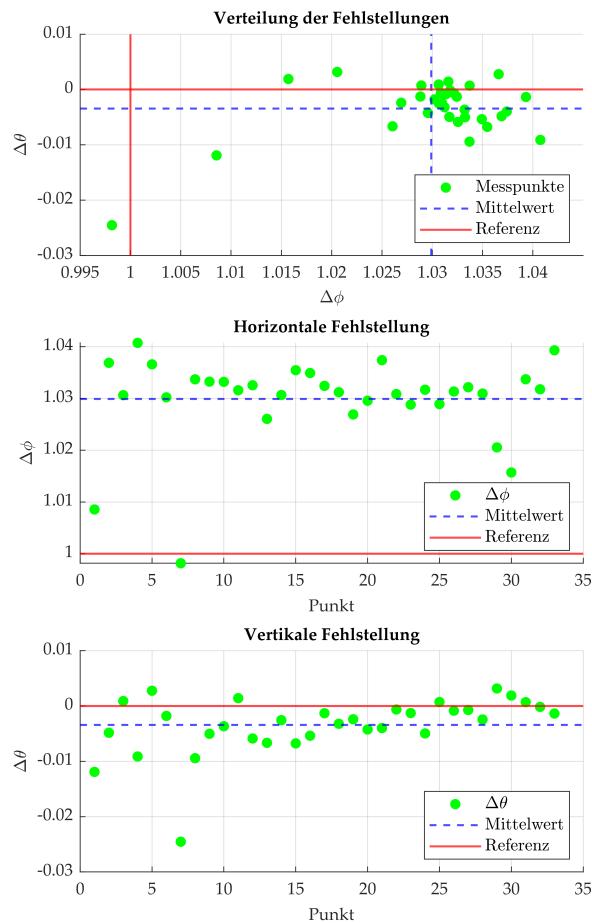


Abbildung A.5: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 3

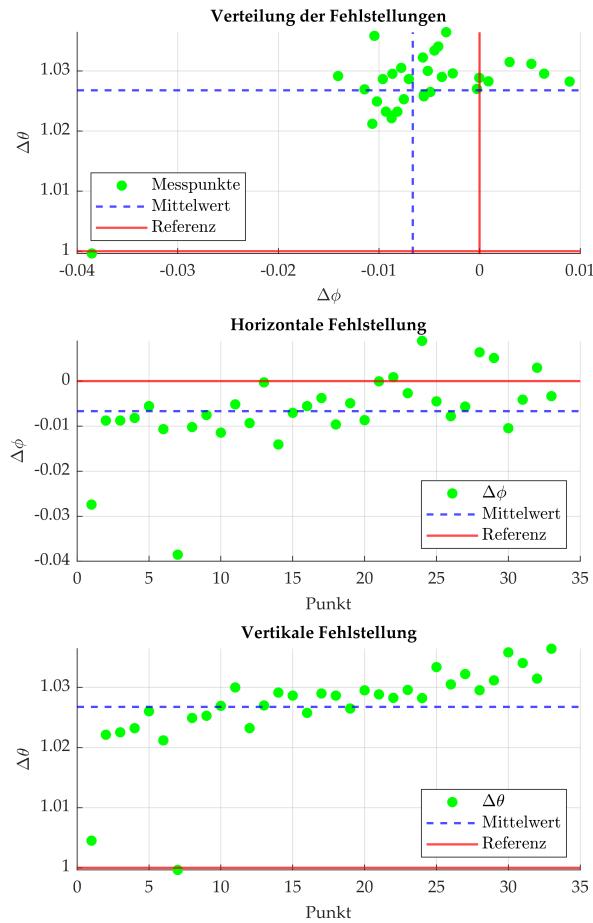


Abbildung A.6: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 4

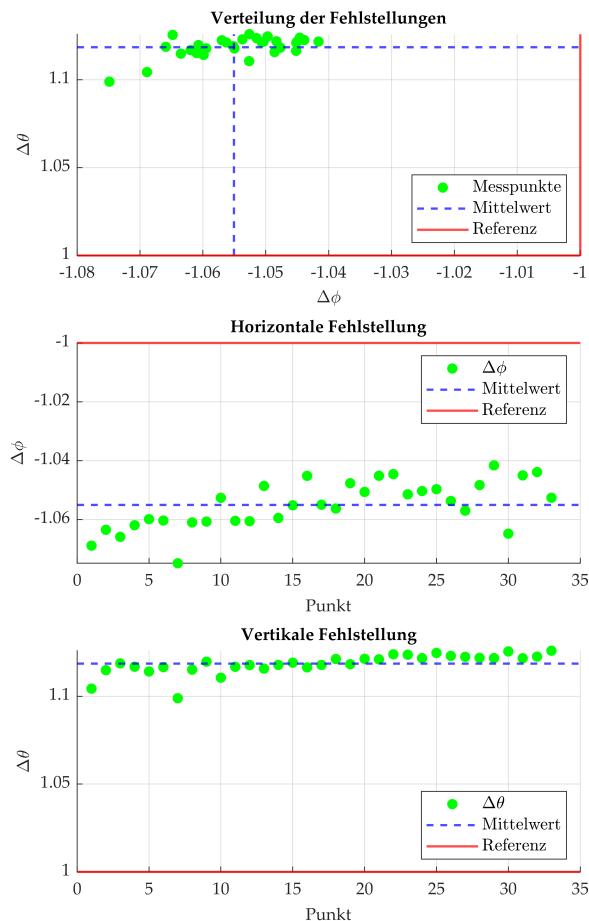


Abbildung A.7: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 5

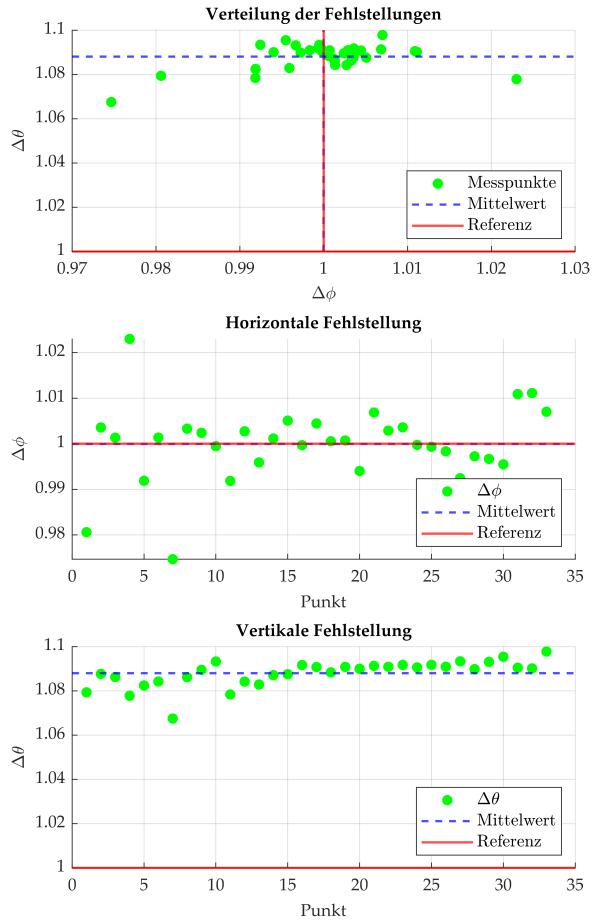


Abbildung A.8: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 6

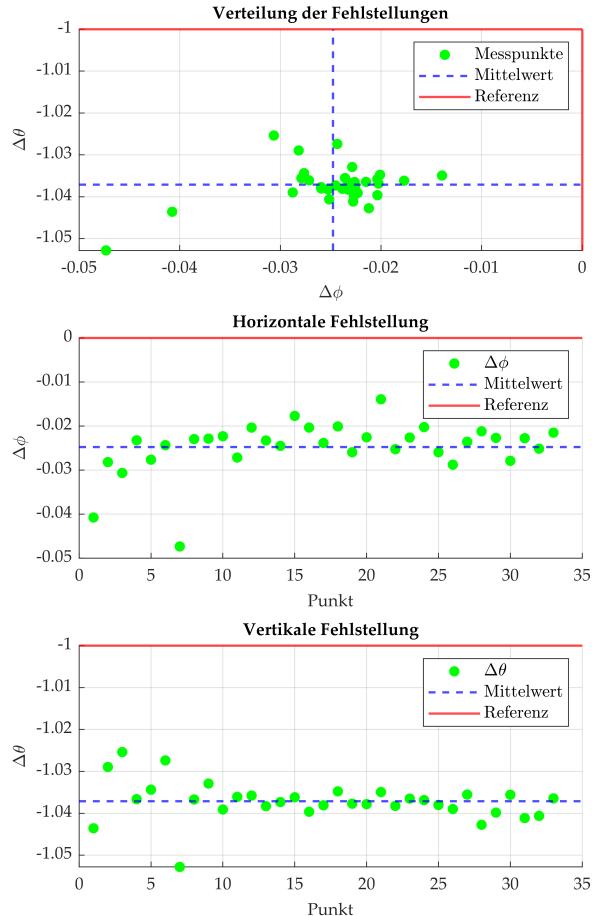


Abbildung A.9: Verteilung der Fehlstellungen [$^\circ$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 7

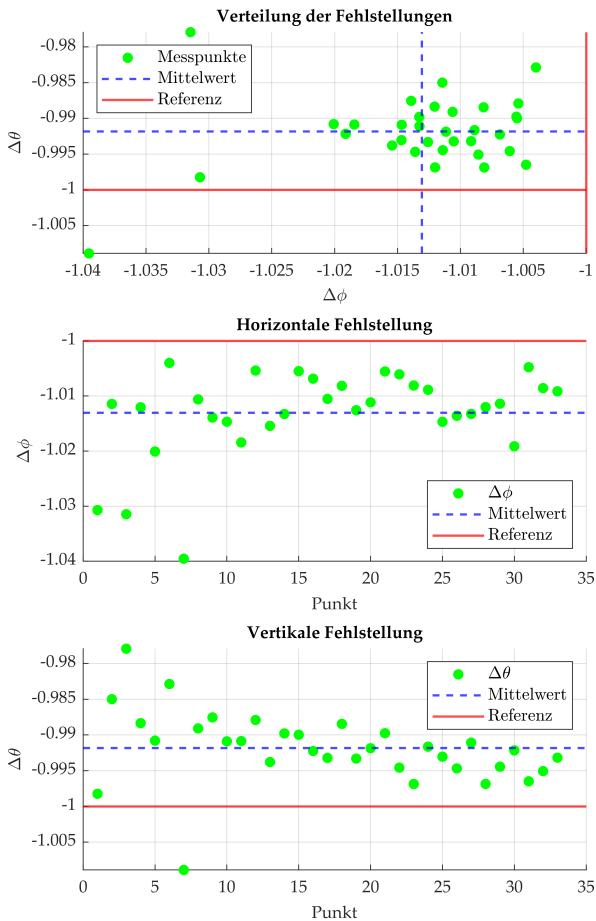


Abbildung A.10: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 8

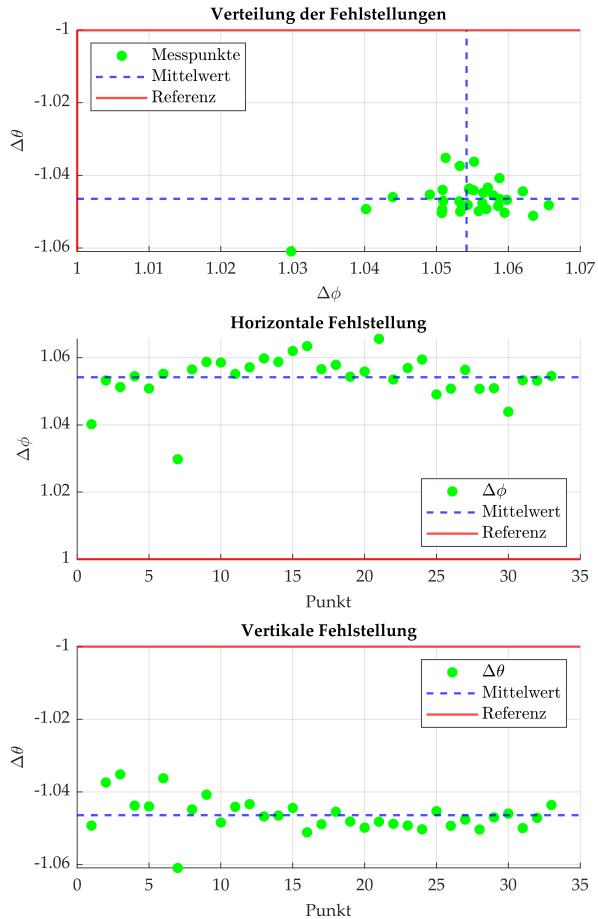


Abbildung A.11: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 1, Position 9

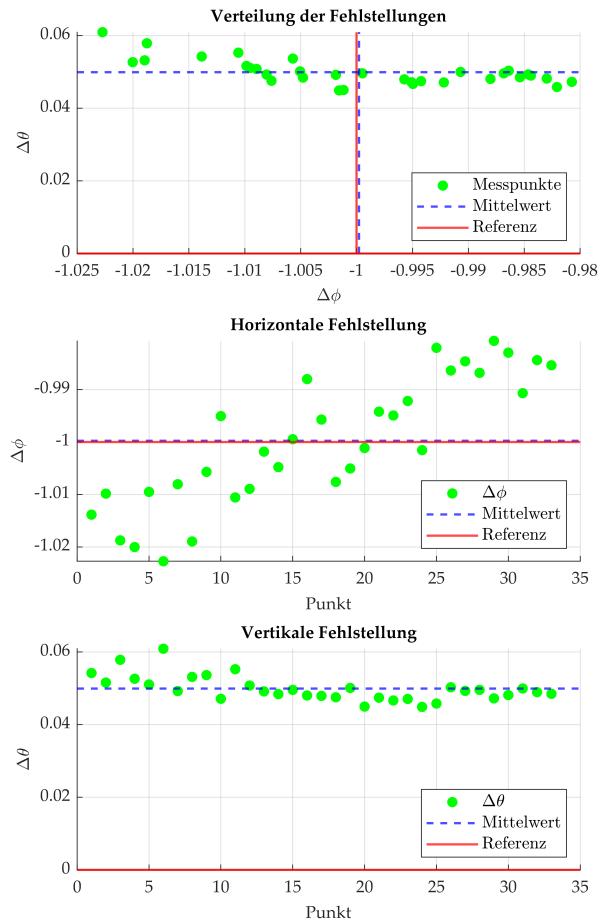


Abbildung A.12: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 2

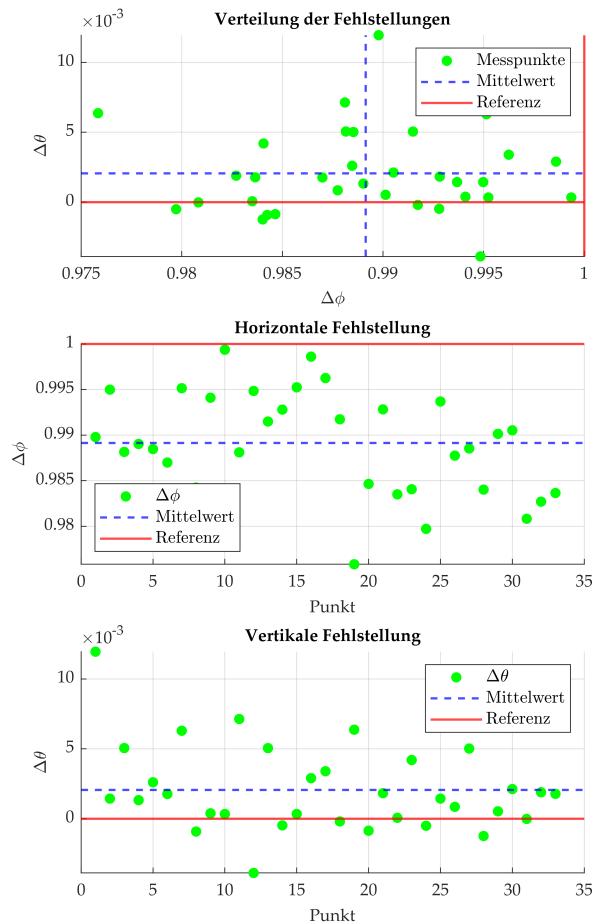


Abbildung A.13: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 3

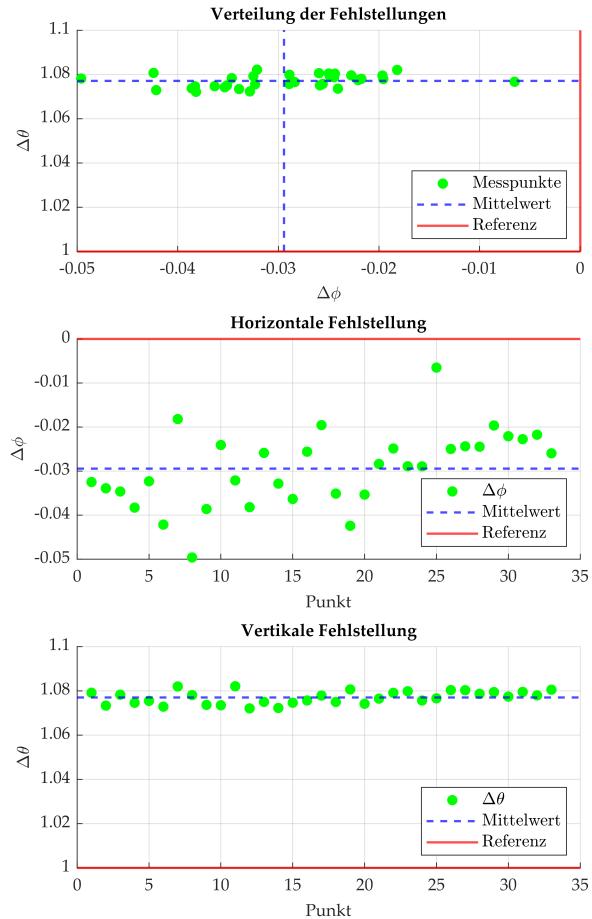


Abbildung A.14: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 4

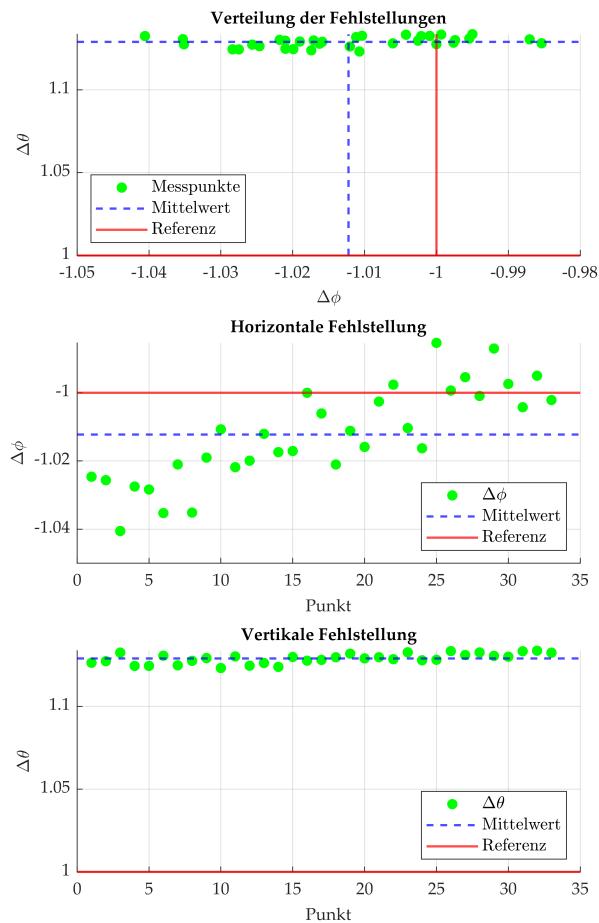


Abbildung A.15: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 5

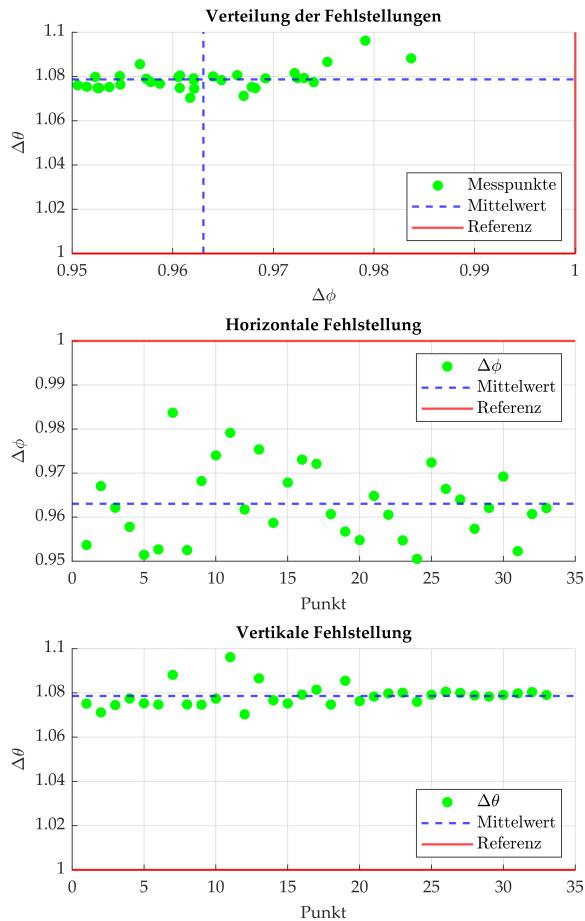


Abbildung A.16: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 6

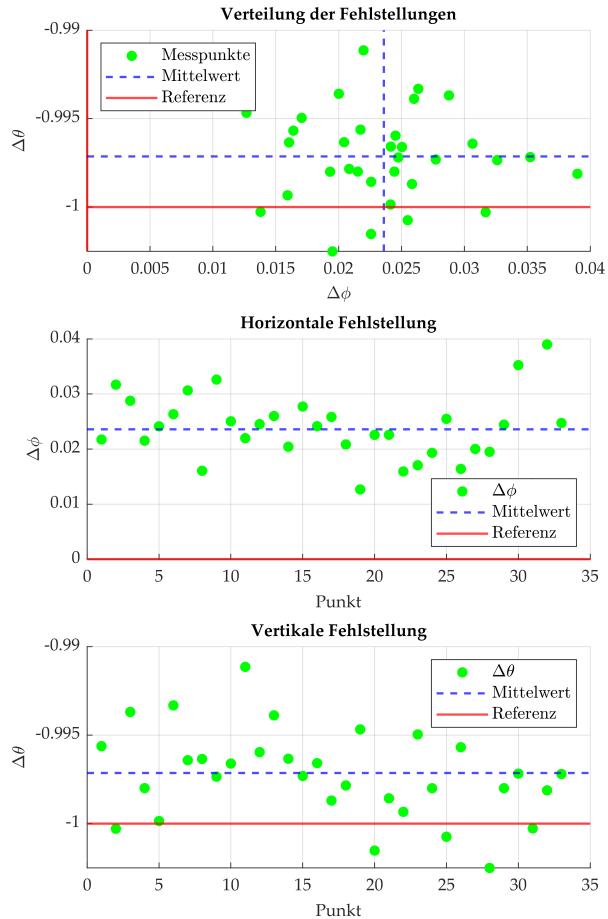


Abbildung A.17: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 7

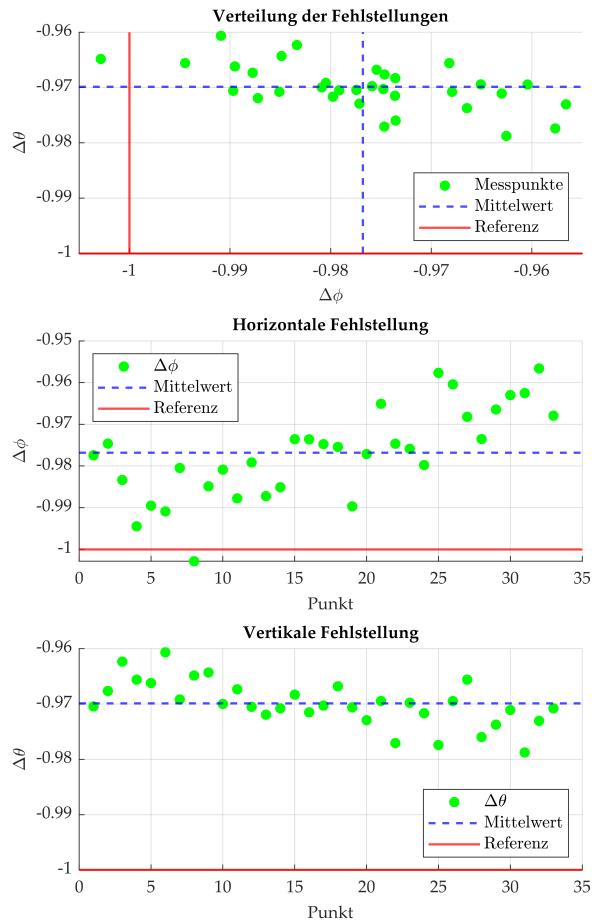


Abbildung A.18: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 8

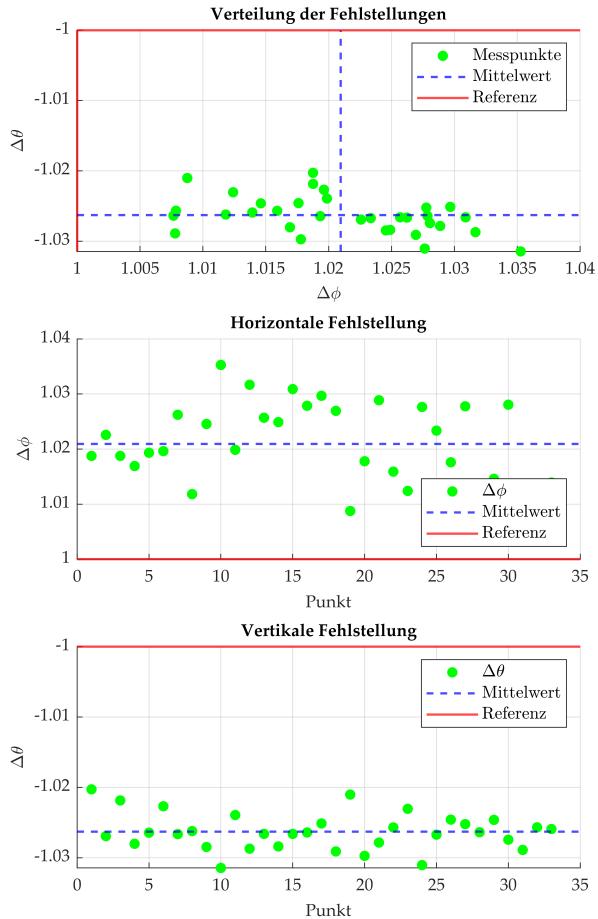


Abbildung A.19: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 2, Position 9

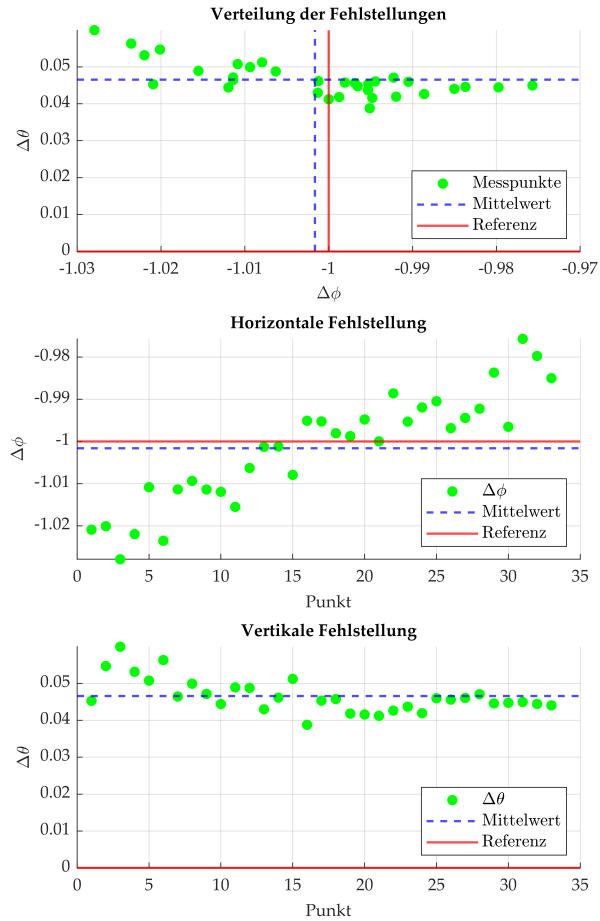


Abbildung A.20: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 2

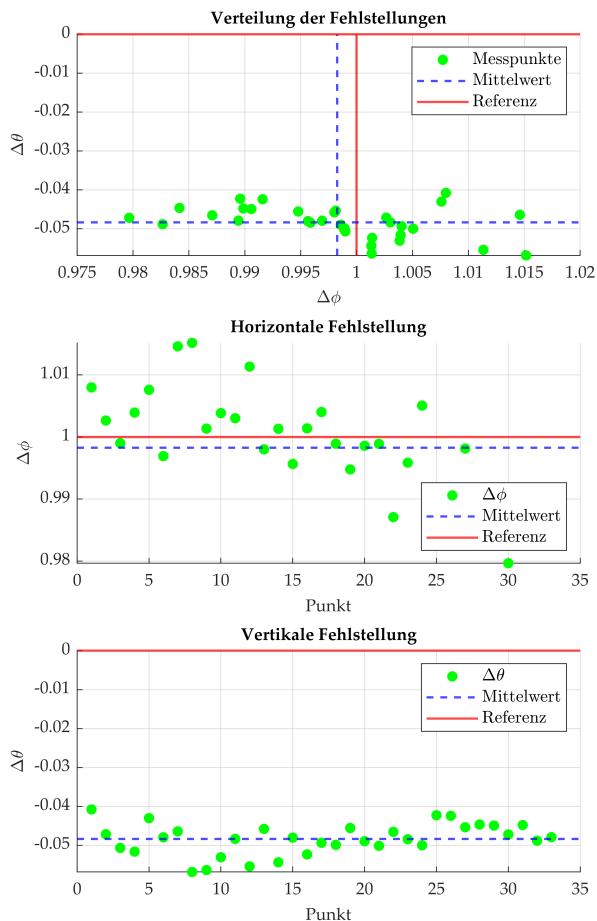


Abbildung A.21: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 3

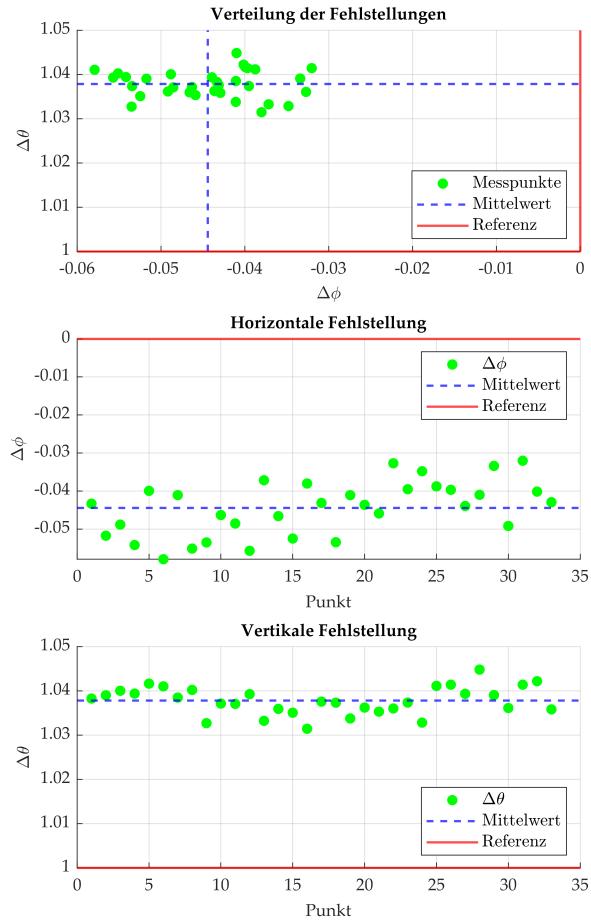


Abbildung A.22: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 4

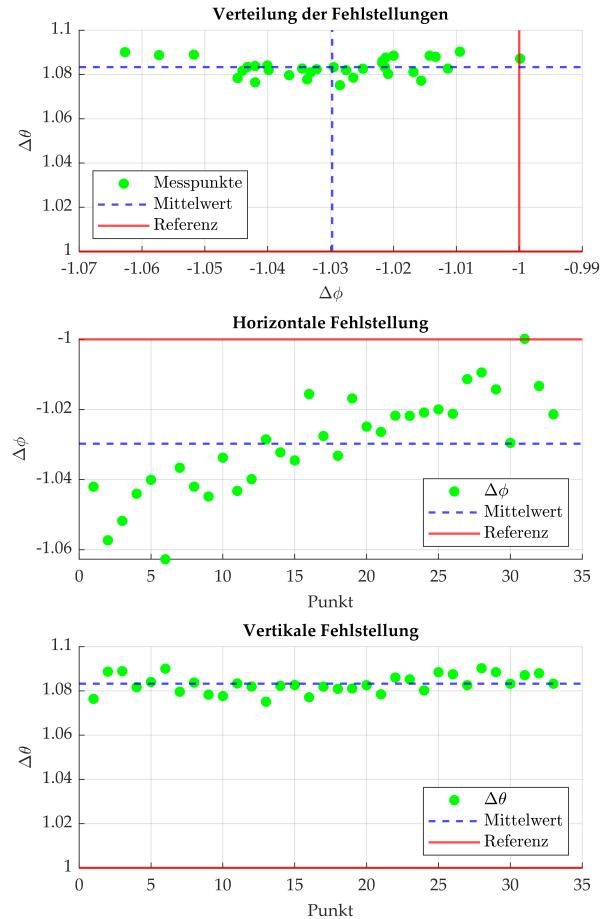


Abbildung A.23: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 5

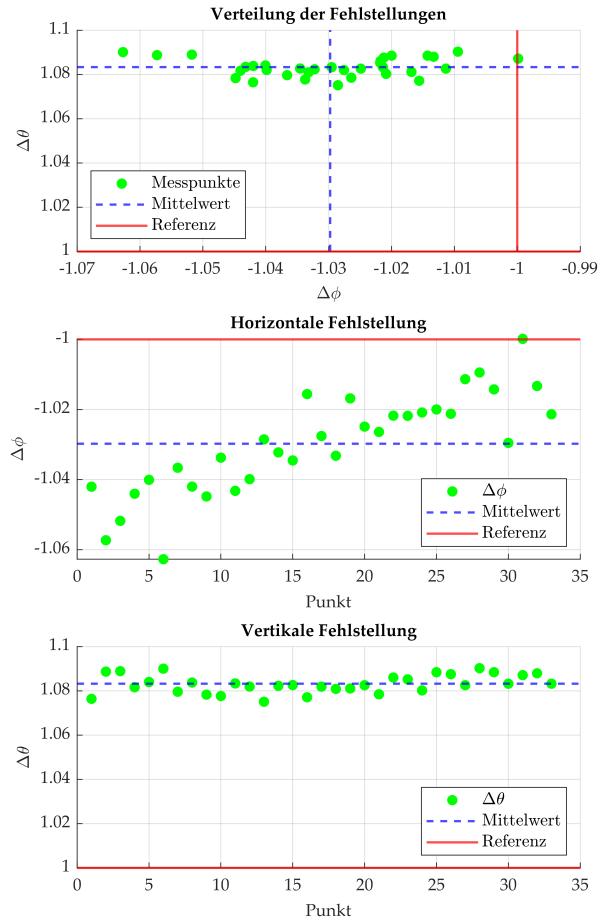


Abbildung A.24: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 6

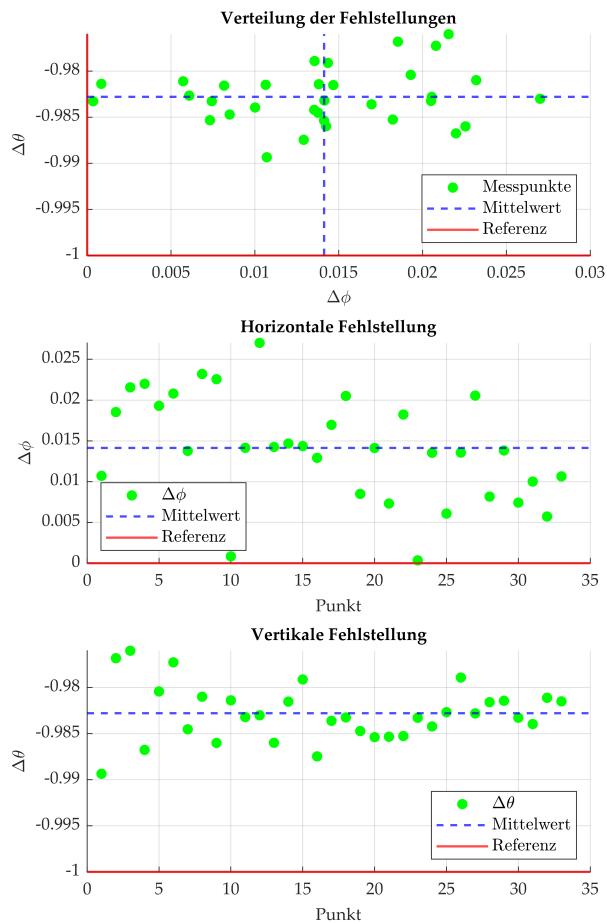


Abbildung A.25: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 7

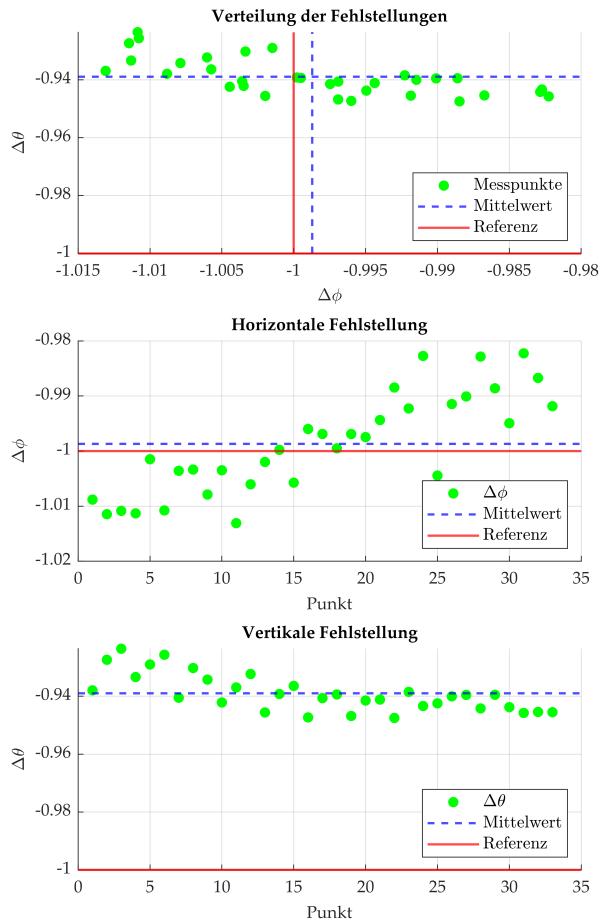


Abbildung A.26: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 8

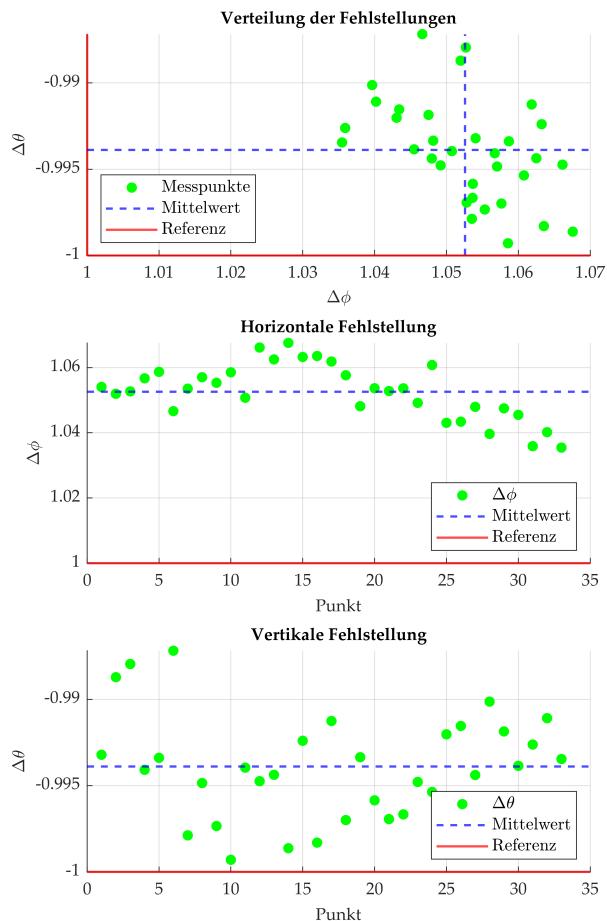


Abbildung A.27: Verteilung der Fehlstellungen [$^{\circ}$] je Messpunkt in horizontaler und vertikaler Richtung bei Distanz 3, Position 9