

Entwicklung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Sebastian Söhner

geb. in: Mosbach

Tag der mündlichen Prüfung: 23.04.2015

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

1. Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

2. Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Bortolazzi

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.

Sebastian Söhner
Weissach, den 06.03.2015

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Dr.-Ing. h. c. F. Porsche AG in der Abteilung Elektrik Elektronik Karosserie Lichtelektronik in Weissach. Durch das Arbeitsumfeld in Weissach wurde mir die Möglichkeit gegeben meinen Untersuchungen nachzugehen, dafür möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Wilhelm Stork, der mir in den letzten drei Jahren mit Rat und Tat zur Seite stand und mir wertvolle Informationen im Hinblick auf die Durchführung meiner Dissertation gegeben hat. Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Bortolazzi bedanken, der als Abteilungsleiter der Abteilung Elektrik Elektronik Karosserie mein Promotionsvorhaben ermöglicht hat und das Thema der automatisierten Scheinwerfereinstellung als festen Bestandteil lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme bei Porsche unterstützt. Darüber hinaus gilt Herrn Peter Heimpel mein Dank, der mich zu Beginn der Promotion in seiner Fachabteilung aufgenommen hat und mir damit die Basis für meine Arbeit gegeben hat. Einen ganzen besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Torsten Schaal aussprechen, der mich als Praktikant zu Porsche geholt hat, mich als Doktorand in der Abteilung gefördert hat und durch seine konstruktiven Einwürfe maßgeblich zum Gelingen meiner Doktorarbeit beigetragen hat. Torsten vielen Dank.

Weiter möchte ich den von mir betreuten Studenten danken, die mit ihrer Arbeit meine Untersuchungen unterstützt haben. Ebenso gilt mein Dank den Kollegen der Fachabteilung Lichtelektronik, die bei Fachfragen immer bereit waren zu helfen. Ich danke ebenso den Doktoranden des Porsche Doktorandennetzwerks für den fachlichen Austausch, im Besonderen danke ich Christian Jürgens für die Zusammenarbeit bei weiteren Vorentwicklungsthemen. Darüber hinaus danke ich allen Beteiligten für die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Schließlich möchte ich meinen Eltern dafür danken, dass sie mir meine Ausbildung ermöglicht und mich immer unterstützt haben. Meiner Freundin Elena möchte ich für ihre Geduld danken, die Sie bewiesen hat, wenn die Arbeit an der Dissertation den Tagesablauf bestimmt hat. Ihr seid die wichtigsten Personen in meinem Leben, ich danke euch vielmals für das Durchhalten in den letzten Jahren, ohne euch wäre das nicht möglich gewesen.

Sebastian Söhner
Weissach, den 06.03.2015

Zusammenfassung

Die innovativen Scheinwerfersysteme tragen dazu bei, die Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr zu erhöhen und den Fahrkomfort für den Fahrer zu steigern. Damit dem postulierten Sicherheitsgewinn in der Theorie eine Verbesserung der Ausleuchtung bei Nacht in der Praxis folgt, ist eine korrekte Grundausrichtung der Scheinwerfer notwendig. Trotz der jährlich durchgeführten *Lichttests* zeigt sich keine Verbesserung bei der Scheinwerfereinstellung, wohingegen der Funktionsumfang bei den Scheinwerfersystemen einen stetigen Zuwachs erfährt.

Die vorliegende Arbeit umfasst die Entwicklung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung, die grundlegend das Verfahren der aktiven Triangulation nutzt. Die Anwendung des in der Literatur bekannten Messverfahrens für die Scheinwerfereinstellung definiert das Alleinstellungsmerkmal der Arbeit.

Im Zuge eines mathematischen Ersatzmodells werden simulativ die Lösungsansätze für das Triangulationsverfahren zwischen dem Hauptscheinwerfer und der Fahrerassistenzkamera erarbeitet und verifiziert. Der Vorteil der geringen Anzahl an Einflussfaktoren der verwendeten Kalibriermethode zeigt sich in der guten Vergleichbarkeit der theoretischen und der experimentellen Untersuchungsergebnisse. Gleichzeitig ist die Variantenvielfalt der Kalibrierausführung durch das Simulationsmodell bewertbar und folglich der Erprobungsaufwand minimierbar.

Alternative Kalibrierverfahren zeigen hinsichtlich einer flexiblen Ausführung Schwächen, während die Anwendung der aktiven Triangulation nahezu beliebig angepasst werden kann. Die verfügbaren Parameter sind hierbei die Wiederholrate des Kalibriervorgangs und die Anzahl der genutzten charakteristischen Punkte der Lichtverteilung sowie die Dichteverbundenheit und die resultierende Clustergröße des Trackingverfahrens. Der H0V0-Punkt der Hell-Dunkel-Grenze wird als detektierbares Charakteristikum der Scheinwerferlichtverteilung definiert. Die Detektion dieses Punkts geht auf einen adaptiven Bildverarbeitungsalgorithmus zurück, der im Zuge der Systemuntersuchung entwickelt wird. Durch die Verlagerung der Lichtverteilung ist die Basis gegeben, um mittels Triangulation die Scheinwerferfehlstellungen in horizontaler und vertikaler Richtung zu bestimmen.

Neben den prototypischen Umsetzungen der vorgestellten automatisierten Scheinwerfereinstellung mit einem Serienscheinwerfer und einem Prototypenscheinwerfer wird eine kritische Betrachtung der experimentellen Kalibrierergebnisse durch ein Referenzmessverfahren realisiert. Folglich besteht die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit des Systems mit den Angaben in der Literatur zu vergleichen. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse einer Probandenstudie und die Auswertungen eines indirekten Leuchtdichtemessverfahrens zur Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung

identische Resultate im Vergleich zu den Kalibrierergebnissen der erarbeiteten automatisierten Scheinwerfereinstellung. Zusätzlich wird der Nachweis erbracht, dass die Bewertung der Hell-Dunkel-Grenze durch die Fahrerassistenzkamera in guter Näherung mit den lichttechnischen und den subjektiven Beurteilungen übereinstimmt. Den Empfehlungen für die Serienumsetzung ist eine Spezifikation der Kalibrierung in der Produktionslinie und im Fahrbetrieb zu entnehmen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Untersuchungsfelder	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik	4
2.1 Grundlagen Hauptscheinwerfer	4
2.1.1 Grundlichtverteilungen	4
2.1.2 Optische Systeme	6
2.1.3 Lichtquellen	8
2.2 Sensorgestützte und prädiktive Lichtfunktionen	10
2.2.1 Automatische Leuchtweitenregulierung	10
2.2.2 Dynamisches Kurvenlicht	11
2.2.3 Adaptives Frontbeleuchtungssystem	12
2.2.4 Prädiktive Lichtsteuerung	14
2.3 Kamerabasierte Lichtfunktionen	14
2.3.1 Kamerasysteme	15
2.3.2 Fernlichtassistent	16
2.3.3 Gleitende Leuchtweite	17
2.3.4 Blendfreies Fernlicht	18
2.4 Scheinwerfereinstellung	21
2.4.1 Manuelle und kamerabasierte Lichteinstellung	21
2.4.2 Statistische Befunde zur Scheinwerferfehlstellung	23
2.5 Einfluss der Scheinwerferausrichtung auf die Lichtfunktionen	26
3 Automatisierte Scheinwerfereinstellung	28
3.1 Bekannte Konzepte	28
3.1.1 Überblick über die Kalibrieransätze	29
3.1.2 Untersuchungsergebnisse prototypischer Umsetzungen	31
3.1.3 Wiederholrate des Kalibriervorgangs	34
3.1.4 Integrationsmöglichkeit in bestehende Seriensysteme	36
3.2 Innovativer Ansatz für eine automatisierte Scheinwerfereinstellung	38
3.2.1 Standardisierte Bestimmung der Hell-Dunkel-Grenze	38
3.2.2 Aktive Triangulation und optische Kopplung	39
3.2.3 HDG-basierte automatisierte Scheinwerfereinstellung	41
4 Theoretische Umsetzung der aktiven Triangulation	44

4.1	Mathematische Definitionen	44
4.1.1	Geometrische Orientierung der Hell-Dunkel-Grenze	45
4.1.2	Detektionsbereiche der Fahrerassistentenkamera	46
4.2	Geometriemodell	48
4.2.1	Projektionsflächen	48
4.2.2	Parallaxe zwischen Kamera und Scheinwerfer	49
4.2.3	Testvektoren	51
4.3	Bestimmung der Scheinwerferfehlstellungen	52
4.3.1	Erweiterung des Geometriemodells	53
4.3.2	Berechnungsverfahren	53
4.4	Verifizierung des Berechnungsverfahrens	57
4.4.1	Aufbau der Simulationsumgebung	57
4.4.2	Einfluss des Kameradiskretisierungsgrads	59
4.4.3	Einfluss der Anzahl der charakteristischen Punkte	63
4.4.4	Einfluss der Anordnung der charakteristischen Punkte	65
4.4.5	Einfluss der Detektionsdistanz	66
5	Systemablauf	70
5.1	Adaptiver Bildverarbeitungsalgorithmus	70
5.1.1	Segmentierung und Bildvorverarbeitung	71
5.1.2	Merkmalsextraktion	75
5.2	Systemsteuerung	80
5.2.1	Plausibilitätsprüfung und Tracking	81
5.2.2	Aktivierung und Deaktivierung des Gesamtsystems	83
5.2.3	Scheinwerferansteuerung	84
5.3	Ermittlung und Anpassung der Scheinwerferausrichtung	87
5.3.1	Modellansätze und Berechnungsverfahren	88
5.3.2	Schätzung der Scheinwerferfehlstellung	91
5.3.3	Adaption der Scheinwerferausrichtung	93
6	Experimentelle Untersuchungen	95
6.1	Prototypische Integration	95
6.1.1	Versuchsträger	95
6.1.2	Scheinwerfersysteme	96
6.1.3	Referenzmessverfahren	97
6.2	Voruntersuchungen zur Hell-Dunkel-Grenze	99
6.2.1	Einstelltoleranzen der visuell-manuellen Methode	100
6.2.2	Beurteilung der detektierten Hell-Dunkel-Grenze	103
6.2.3	Geometrische HDG-Änderung und Klassifizierungsverfahren	107
6.3	Anwendung des Kalibrierverfahrens bei einem Serienscheinwerfer	110
6.3.1	Vergleich der verschiedenen Berechnungsansätze	110
6.3.2	Einfluss der Anordnung der charakteristischen Punkte	112
6.3.3	Einfluss der Detektionsdistanz	115
6.3.4	Untersuchung des Kalibrierverfahrens im Verkehrsraum	119
6.4	Adaption des Kalibrierverfahrens auf einen Matrixscheinwerfer	123
6.4.1	Anpassungen im Kalibrierablauf	123
6.4.2	Untersuchungen unter statischen Bedingungen	125

6.4.3	Untersuchungen unter dynamischen Bedingungen	127
6.5	Diskussion der experimentellen Untersuchungsergebnisse	129
7	Empfehlungen für die Serienumsetzung	132
7.1	Anforderungsanalyse und Parametrierung der Kalibrierung	132
7.2	Teststrategie	133
7.3	Zielarchitektur	133
8	Ergebnisse und Ausblick	136
	Anhang	138
A	Berechnungsalgorithmus	138
A.1	Berechnungsverfahren mit explizitem Lösungsweg	138
A.1.1	Lösungsweg für Modellansatz 1	138
A.1.2	Lösungsweg für Modellansatz 2	141
A.2	Newton-Verfahren für Modellansatz 3	146
A.2.1	Newton-Verfahren	146
A.2.2	Anwendung des Newton-Verfahrens	147
B	Versuchsdurchführungen und Messergebnisse	149
B.1	Versuchsdurchführungen	149
B.1.1	Winkelverteilungen der charakteristischen Positionen	149
B.1.2	Probandenstudie und indirekte Leuchtdichtemessung	152
B.2	Messergebnisse	156
B.2.1	Kalibrierergebnisse bei zwei charakteristischen Punkten	156
B.2.2	Unsicherheit der HDG-Detektion	159
B.2.3	Winkelversätze zwischen den einzelnen Hell-Dunkel-Grenzen	161
C	Bildverarbeitung und Messdaten	163
C.1	Bildverarbeitung	163
C.2	Messdaten	164
D	Hardware und Software	166
D.1	Entwicklerkamarasystem	166
D.2	Leuchtdichtekamera	166
D.3	CANLog	167
D.4	Sonstiges	168
	Abkürzungsverzeichnis	169
	Formelzeichen	171
	Literaturverzeichnis	179
	Betreute Arbeiten	191
	Publikationsliste	192

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Antrieb in der Entwicklung automobiler Scheinwerfersysteme ist der stets existente Anspruch, bestmögliche Sichtverhältnisse für den Fahrzeugführer zu schaffen, ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Dieser Sachverhalt ist als Zielkonflikt in der automobilen Lichttechnik bekannt [100] und definiert das unumstrittene Kriterium, das bei der Bewertung von Scheinwerfersystemen herangezogen wird [63], [118]. Die Lösungsansätze, die diesem Anspruch gerecht werden, bilden heute das Fundament wissenschaftlicher Arbeiten und Veröffentlichungen.

Aktuelle Forschungsfelder im Kontext automobiler Scheinwerfersysteme umfassen Untersuchungen zu blendfreien Fernlichtsystemen [55], [112], [121], zu laserbasierten Lichtfunktionen [3], [126], [75] und zur prädiktiven, energieeffizienten Lichtsteuerung [44], [6], [7], [76], [74]. In diesem Zusammenhang kann bereits von Innovationen gesprochen werden, da ein Großteil der untersuchten Systeme am Markt erhältlich ist.

Bei den blendfreien Fernlichtsystemen, die eine dauerhafte Fahrt mit Fernlicht durch eine aktive Entblendung der übrigen Verkehrsteilnehmer ermöglichen, etabliert sich neben den bereits diskutierten Fragestellungen zu den genutzten optischen Konzepten [94], [9], der Wahrnehmung der Funktionen [121], [87] und der Bewertung der Systeme [55], [112] das Themengebiet der Präzision der Systeme [42]. Einflüsse, die durch eine unbekannte oder toleranzbehaftete Scheinwerfereinstellung gegeben sind, können bei blendfreien Fernlichtsystemen in Form von Sicherheitsbereichen vorgehalten werden [55], [121], [101]. Eine kontinuierliche Überprüfung der Scheinwerferausrichtung ist als Innovation jedoch noch nicht verfügbar. Wird der Fokus auf alle gängigen Scheinwerfersysteme erweitert, kann unter Beachtung der jährlich durchgeführten *Lichttests* eine Stagnation der prozentual erfassten Mängel hinsichtlich der Scheinwerfereinstellung aufgezeigt werden [66], [65], [64], [20], [19], [18], was zwangsläufig den Nutzen der innovativen Lichtfunktionen limitiert [38].

Eine korrekte Grundeinstellung der Scheinwerfer ist für die Erfüllung des Zielkonflikts hinsichtlich Blendung [81] und Erkennbarkeitsentfernung [123] absolut notwendig. Durch die zunehmende Aktivierungsrate der blendfreien Fernlichtsysteme [55] in Verkehrsszenen mit erhöhter Verkehrsdichte rückt die Forderung nach präzisen Systemen noch stärker in den Fokus, da bei falsch eingestellten Scheinwerfern eine Blendung durch das Fernlicht möglich ist.

Der Trend zur Überprüfung der Ausrichtung der Scheinwerfersysteme erfährt seit kurzer Zeit zunehmende Beachtung [121], [71], [103], [120], [117]. Jedoch sind die Art der Kalibrierung und ein möglicher Serieneinsatz noch nicht abzusehen. Die Untersuchung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mit Fokus auf eine seriennahe Umsetzung scheint demnach erforderlich, um die Präzision der Scheinwerfersysteme im Feld dauerhaft zu gewährleisten.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Untersuchungsfelder

Die aus den aktuellen Untersuchungsfeldern der automobilen Frontbeleuchtung abgeleitete Notwendigkeit einer Gewährleistung der Präzision der Scheinwerfersysteme legt den Schluss nahe, eine automatisierte Scheinwerfereinstellung im Kontext einer seriennahen Entwicklung zu untersuchen.

Zielsetzung: Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, ein Kalibrierverfahren zu entwickeln, das mittels einer Fahrerassistenzkamera und eines Serienscheinwerfersystems umgesetzt werden kann. Der Kalibrieransatz ist flexibel gegenüber gängigen Serienscheinwerfersystemen zu gestalten und soll ohne einen Eingriff in die Lichtverteilung des Scheinwerfers durchführbar sein. Darüber hinaus ist auf zusätzliche Sensorinformationen zur Bestimmung der Fehlstellung zu verzichten. Aufgrund der Nutzung der Fahrerassistenzkamera ist ein Bildverarbeitungsalgorithmus zu entwickeln, der die notwendigen Kalibrierinformationen aus der Lichtverteilung des Scheinwerfers extrahiert. Im Hinblick auf die Bewertung des Systems sind theoretische Betrachtungen und experimentelle Untersuchungen im Feld durchzuführen. Die Anwendbarkeit des Systems ist über einen Abgleich zwischen Kalibrierergebnissen und Referenzgrößen aufzuzeigen. Das hierfür notwendige Referenzmessverfahren ist ebenfalls zu entwickeln. Weiter soll über einen Vergleich der experimentell ermittelten Standardabweichungen des Kalibrierverfahrens mit den Werten aus der Literatur eine Beurteilung des Gesamtsystems erfolgen.

Abgrenzung der Untersuchungsfelder: Die automatisierte Scheinwerfereinstellung wird vom geometrischen Grundprinzip bis zum fertigen Kalibriersystem entwickelt und validiert. Die sich ergebenden Kalibrierszenarien werden im Zuge der experimentellen Untersuchungen erwähnt, aber nicht näher erläutert. Es wird keine explizite Verkehrsraumanalyse durchgeführt. Bezüglich der Entwicklung des Bildverarbeitungsalgorithmus wird ein unüberwachtes Verfahren verwendet. Alternative Vorgehensweisen auf der Basis neuronaler Netze sind der Literatur zu entnehmen [117]. Die Bildverarbeitung ist als Systembestandteil beispielhaft zu sehen, das Kalibrierverfahren selbst steht im Vordergrund. Im Zuge der standardisierten Bestimmung der Hell-Dunkel-Grenze wird ein Vergleich zwischen der aus dem Kamerabild extrahierten Hell-Dunkel-Grenze mit einer subjektiv bewerteten Hell-Dunkel-Grenze durch Probanden sowie mit einer rechnerisch bestimmten Hell-Dunkel-Grenze aus

den Leuchtdichteaufnahmen dargestellt. Es werden keine weiteren Untersuchungen zur standardisierten Bestimmung der Hell-Dunkel-Grenze durchgeführt, siehe hierzu [105], [95]. Zur Bewertung des Gesamtsystems werden die Standardabweichungen der Kalibrierergebnisse und die Vergleiche mit der Referenzmessung herangezogen. Auf etwaige Untersuchungen zur Erkennbarkeitsentfernung und zur Blendung sowie zur Reduzierung des Sicherheitsbereichs von blendfreien Fernlichtsystemen wird verzichtet.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit ist in den Stand der Technik, die theoretische Betrachtung des Kalibrierverfahrens, die experimentellen Untersuchungen zum Gesamtsystem und abschließende Empfehlungen zur Serienentwicklung gegliedert.

Zu Beginn wird der Stand der Technik in Kapitel 2 dargestellt. Im Speziellen werden in diesem Teil der Arbeit die Grundlichtverteilungen und weitere Lichtfunktionen vorgestellt. Ferner werden statistische Befunde zur Scheinwerfereinstellung genannt und beispielhaft die Notwendigkeit der Scheinwerfereinstellung für einen Teil der präsentierten Lichtfunktionen herausgestellt.

Die nachfolgenden Ausführungen sehen unter anderem die Durchführung einer Anforderungsanalyse für eine automatisierte Scheinwerfereinstellung im Kontext einer seriennahen Entwicklung vor. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein der Literatur nicht bekanntes Kalibrierverfahren für Hauptscheinwerfer abgeleitet, Kapitel 3. Dem Kalibrieransatz wird ein Gleichungssystem zugeordnet, worin die Fehlstellungen der Hauptscheinwerfer als unbekannte Größen eingehen. Die Lösung des entsprechenden Gleichungssystems sowie eine Verifizierung der theoretischen Kalibrierergebnisse in einer Simulationsumgebung bilden den Hauptteil der theoretischen Untersuchungen, Kapitel 4.

In Kapitel 5 wird der Systemablauf der automatisierten Scheinwerfereinstellung dargestellt. Das System umfasst einen eigens für die Kalibrierung entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmus und eine Ansteuerlogik für die Scheinwerfer. In Kapitel 6 wird der prototypische Aufbau zweier Versuchsträger für die automatisierte Scheinwerfereinstellung vorgestellt. Das Kalibrierverfahren wird mit einem Serienscheinwerfersystem und mit einem in der Serienentwicklung befindlichen Prototypenscheinwerfersystem umgesetzt. Der in Kapitel 5 dargestellte Systemablauf wird unter der Verwendung des in Kapitel 4 abgeleiteten Berechnungsverfahrens im Labor und im Feld experimentell untersucht.

Abschließend werden auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen Empfehlungen für die Serienentwicklung gegeben, Kapitel 7, die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und mögliche zukünftige Untersuchungsfelder genannt, Kapitel 8.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik der automobilen Frontbeleuchtung gegeben. Themenschwerpunkte bilden grundlegende Informationen zum Hauptscheinwerfer, Abschnitt 2.1, sowie die Einführung der verschiedenen Lichtfunktionen, die auf Basis der genutzten Sensorik klassifiziert werden, Abschnitte 2.2 und 2.3. Zusätzlich wird die Scheinwerfereinstellung thematisiert, Abschnitt 2.4, und die Notwendigkeit der korrekten Scheinwerfergrundausrüstung hinsichtlich ausgewählter Lichtfunktionen aufgezeigt, Abschnitt 2.5.

2.1 Grundlagen Hauptscheinwerfer

Die Basisausleuchtung der automobilen Hauptscheinwerfer ist bei Dunkelheit durch das Abblendlicht und das Fernlicht gegeben. In Abschnitt 2.1.1 wird deren grundlegender Aufbau thematisiert und eine Definition des Begriffs „Hell-Dunkel-Grenze“ abgeleitet. Ausgehend von den genannten Grundlichtverteilungen werden die optischen Systeme zur Umsetzung der Ausleuchtung vorgestellt, Abschnitt 2.1.2. Ebenso wird eine Einführung in die genutzten Lichtquellen gegeben, Abschnitt 2.1.3.

2.1.1 Grundlichtverteilungen

Das Abblendlicht, das Fernlicht und optional das Nebellicht sind die Grundlichtverteilungen, die jedem Fahrer zur Verfügung stehen [60] und manuell auswählbar sind [100].

Im weiteren Verlauf wird der Fokus auf die Grundlichtverteilungen Abblendlicht und Fernlicht gerichtet. Charakteristisch für die Lichtverteilungen ist das Lichtbild auf der Fahrbahn und auf einer Projektionsfläche 25 m vor dem Fahrzeug. In Abbildung 2.1 werden die Charakteristika in Form von schematischen Beleuchtungsstärkeverteilungen dargestellt. Die Beleuchtungsstärke E_v ist das photometrische Pendant der radiometrischen Größe der Bestrahlungsstärke E_e [51], die den Strahlungsfluss Φ_e pro Fläche A definiert [50], Gleichung (2.1). Der Strahlungsfluss Φ_e bzw. der Lichtstrom Φ_v definieren die gesamte Menge an Licht, die eine Lichtquelle ausstrahlt. Die lichttechnischen Größen sind im Gegensatz zu den entsprechenden strahlungsphysikalischen Größen von der Wellenlänge des Lichts abhängig, was einem selektiven Empfänger entspricht [50], Gleichung (2.2).

$$E_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial A} \quad (2.1)$$

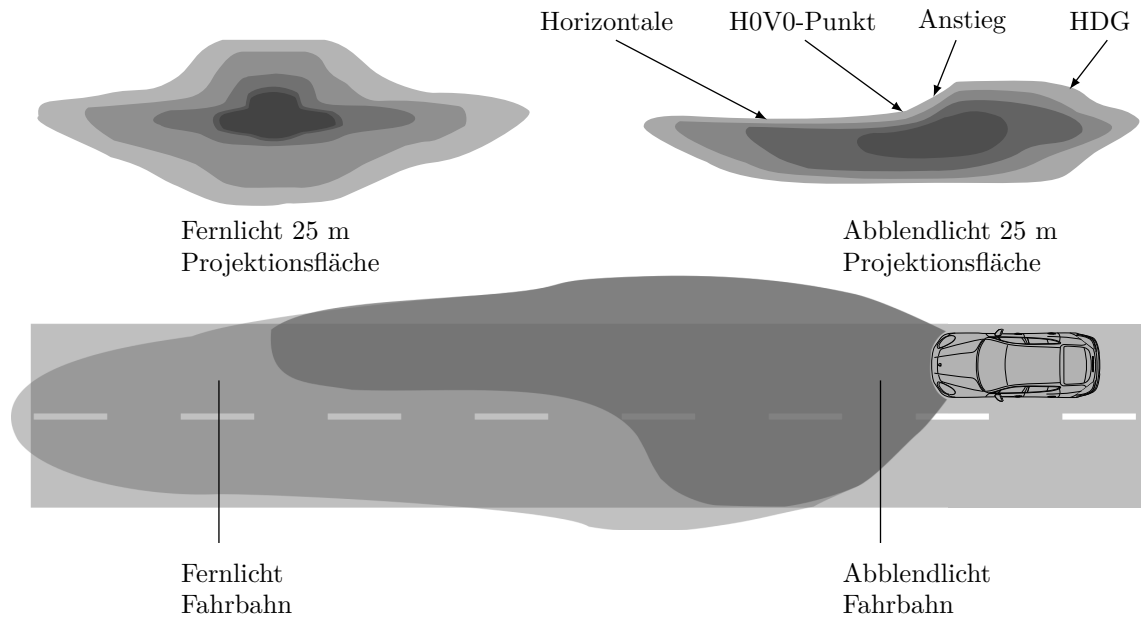


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Grundlichtverteilungen auf einer Projektionsfläche und auf der Fahrbahn

$$\Phi_v = 684 \frac{lm}{W} \cdot \int_{380}^{780} \Phi_e \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

Die Darstellung des Abblendlichts zeigt eine asymmetrische Lichtverteilung auf der Fahrbahn. Diese Art der Ausleuchtung wird durch den Zielkonflikt der automobilen Lichttechnik bedingt, der eine gute Sicht für den Fahrer bei gleichzeitiger Vermeidung der Blendung anderer Verkehrsteilnehmer verlangt [72], [60]. Die dargestellte asymmetrische Form kommt dieser Forderung nach, indem die geometrische Reichweite auf der eigenen Fahrspur erhöht und auf der Gegenfahrbahn verringert wird. Grundsätzlich stellt die Asymmetrie aber keine optimale Lösung des genannten Zielkonflikts dar [60]. Die schematische Beleuchtungsstärkeverteilung auf der Projektionsfläche zeigt dieselbe Abblendlichtverteilung mit einer Asymmetrie am Übergang zwischen beleuchtetem und unbeleuchtetem Bereich. Dieser Bereich wird als Hell-Dunkel-Grenze, kurz HDG, bezeichnet [72], [50]. Die Form und Ausrichtung der HDG beeinflusst maßgeblich die Ausleuchtung im Verkehrsraum, worauf in den Abschnitten 2.2 und 2.3 unter dem Gesichtspunkt der Lichtfunktionen näher eingegangen wird. Das charakteristische Merkmal einer jeden Abblendlichtverteilung ist der H0V0-Punkt der HDG, der als Schnittpunkt zwischen dem horizontalen Teil und dem im Anschluss folgenden Anstieg der HDG [132] definiert werden kann. Der H0V0-Punkt ist der Ausgangspunkt für die Einstellung der Hauptscheinwerfer, siehe hierzu Abschnitt 2.4. Das Fernlicht zeigt im Vergleich zum Abblendlicht eine symmetrische Form und eine größere geometrische Reichweite.

Die limitierenden Faktoren der Lichtverteilungen sind die maximal zulässigen Beleuchtungsstärkewerte auf der definierten Projektionsfläche 25 m vor dem Scheinwerfer. Das Fernlicht darf einen maximalen Beleuchtungsstärkewert von 180 lx nach [132], [54] für Scheinwerfer mit Gasentladungslampen und von 240 lx nach [130], [129] für Scheinwerfer mit LED-Modulen oder Glühlampen nicht überschreiten. Für die Zulassung des Hauptscheinwerfers sind neben den maximalen Beleuchtungsstärkewerten weitere Minima- und Maximaanforderungen hinsichtlich der Beleuchtungsstärkeverteilung für definierte Winkelbereiche der Lichtverteilungen in einer Entfernung von 25 m zu erfüllen. Hierzu sei auf [129], [132] verwiesen.

2.1.2 Optische Systeme

Zur Umsetzung der in Abschnitt 2.1.1 definierten Grundlichtverteilungen werden Reflexions- und Projektionssysteme in einfacher oder multifunktionaler Ausführung eingesetzt [125]. Bei Reflexionssystemen, Abbildung 2.2, wird der Lichtstrom Φ_v , Gleichung (2.2), der Lichtquelle durch die Geometrie eines Reflektors und optionaler Optiken auf der Abschlusscheibe im Verkehrsraum verteilt. Im Falle klarer Abschlusscheiben werden Frei-Form-Reflektoren verwendet, die einen segmentierten oder facettierten Aufbau haben. Bei Abschlusscheiben mit Zylinder- oder Prismenoptiken ist die Reflektorgeometrie elliptisch [125].

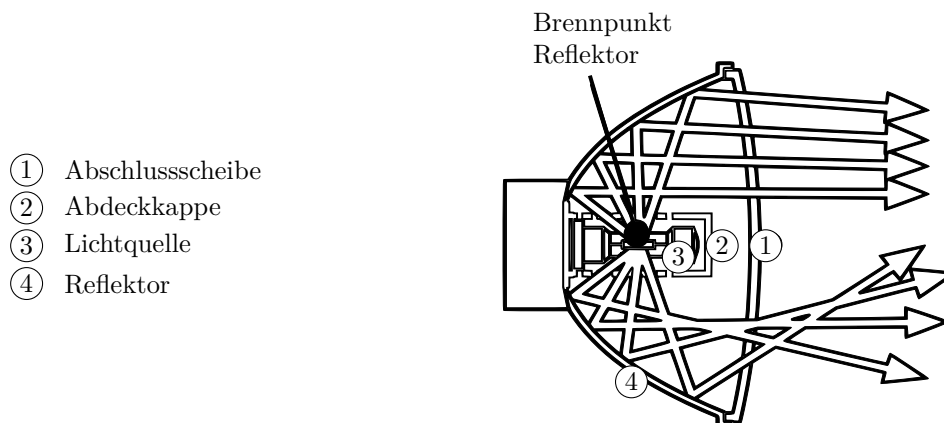


Abbildung 2.2: Reflexionssystem mit Frei-Form-Reflektor und klarer Abschlusscheibe, vergleiche [49]

Projektionssysteme sind aus einem elliptischen Reflektor, einer plankonvexen, asphärischen Linse und einer klaren Abschlusscheibe aufgebaut. Der Lichtstrom wird durch den Reflektor in die Brennpunktebene der Linse fokussiert. Eine integrierte Blende schattet das Licht oberhalb der HDG ab, wodurch eine Abblendlichtverteilung generiert wird, Abbildung 2.3. Über die Kontur der Blende kann die Form der HDG variabel gestaltet werden. Nach den gesetzlichen Regelungen sind HDGs mit einem 15°- und einem 45°-Anstieg erlaubt. Allerdings muss im Falle eines 45°-Anstiegs der linke Teil der HDG nach dem Anstieg horizontal verlaufen, um eine Blendung vorausfahrender Fahrzeuge zu verhindern [130], [129].

Den großflächigen Reflexionssystemen stehen Projektionssysteme mit einer Linsengröße von 40 mm bis 75 mm gegenüber [125], [134], die allerdings aufgrund ihres optischen Aufbaus größere Bautiefen bedingen. Zusätzlich muss bei Projektionscheinwerfern mit Farbfehlern der Linse gerechnet werden, die als chromatische Aberration bezeichnet werden und zu den Bildfehlern 1. Ordnung gehören [108]. Die Abhängigkeit des Brechungsindex n_v von der Wellenlänge λ führt zu einer stärkeren Brechung des kurzwelligen blauen Lichts im Vergleich zu langwelligem roten Licht. Die Folge ist bei außerparaxialen Lichtstrahlen eine chromatische Aberration [92], die den angesprochenen Farbsaum erzeugt.

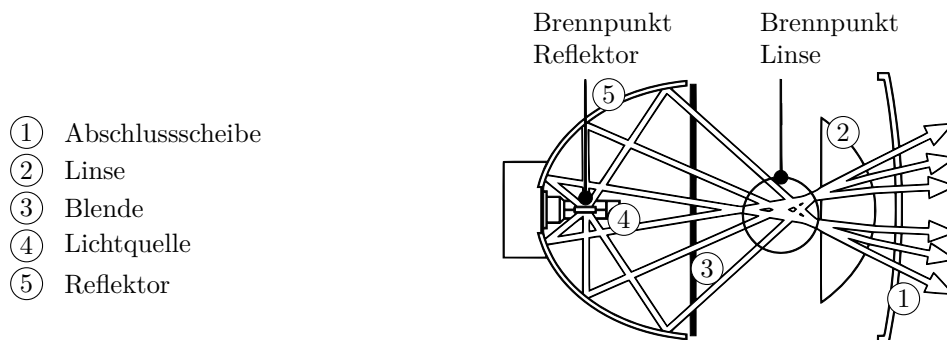


Abbildung 2.3: Projektionssystem, vergleiche [49]

Im Hinblick auf multifunktionale Ausführungen ermöglichen die Projektionssysteme durch eine bewegliche Blende eine Umsetzung des Abblendlichts und des Fernlichts in einem Modul [125]. Zusätzliche Stellmotoren realisieren das Schwenken der Lichtverteilung nach links und rechts sowie nach oben und unten und erweitern somit die Anwendbarkeit des Moduls für weitere Lichtfunktionen, siehe hierzu die Abschnitte 2.2 und 2.3. Eine Integration der Stellmotoren in das optische System bedarf einer spezifischen mechanischen Auslegung der Motoren zur Gewährleistung der Genauigkeit der Lichtverlagerung.

Trends in der automobilen Lichttechnik zeigen ein zunehmendes Streben nach modularen Konzepten mit dem Ziel, Entwicklungsrisiken zu reduzieren und Synergien durch Stückzahleffekte zu nutzen [125]. Demgegenüber steht der Ansatz, die mechanischen Komponenten der Scheinwerfer zu reduzieren, um das Gesamtgewicht und den Aufwand bei der Entwicklung zu verringern [21]. Im Audi A8 (Baujahr 2013) wird ein LED-Scheinwerfer angeboten, der aus mehreren Reflektormodulen besteht und entgegen des subtraktiven Ansatzes mittels eines Projektionssystems die notwendigen Lichtverteilungen additiv durch das Zu- und Abschalten der einzelnen Reflektorsegmente realisiert [16]. Die genannten Aspekte zeigen die Umsetzbarkeit der Lichtverteilungen mit Projektions- und Reflexionsystemen. Die Entscheidung für das jeweilige System unterliegt der individuellen Gewichtung der Hauptanforderungen, die die lichttechnische Qualität, das Design, die Prozessqualität, die Fahrzeugintegration, die Entwicklungszeit und die Entwicklungskosten umfassen [125].

2.1.3 Lichtquellen

In automobilen Hauptscheinwerfern werden Halogenlampen, Xenonlampen und lichtemittierende Dioden, kurz LEDs, eingesetzt. Halogenlampen sind wie Glühlampen thermische Strahler, die abhängig von der Temperatur Energie in Form von Strahlung abgeben. Nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz ist der Anteil der kurzwelligen und damit sichtbaren Strahlung höher, je höher die Temperatur des Körpers ist [96]. Die spektrale Verteilung des Lichts sorgt für eine Farbtemperatur von 3.500 K, was als warmweiß wahrgenommen wird. Halogen- und Glühlampen besitzen einen Wolframdraht, der durch Anlegen eines Stroms zum Glühen gebracht wird. Dennoch unterscheiden sich die Lichtausbeute und die Lebensdauer beider Leuchtmittel. In Halogenlampen wird ein Halogenkreisprozess genutzt, der das Zerfallen des Wolframdrahts durch die thermische Beanspruchung verzögert und höhere Lichtausbeuten ermöglicht.

Nichtthermische Strahler emittieren Licht, indem angeregte Atome oder Moleküle von einem erhöhten Energieniveau in ein niedrigeres Energieniveau übergehen. Die Anregung wird bei Gasentladungslampen in einem Plasma erreicht, in dem ein Energieaustausch zwischen den Teilchen in Form von Stößen erfolgt. Das Plasma bildet sich durch die Ionisierung des Füllgases. Das Spektrum der Xenonlampe enthält charakteristische Spektrallinien, die hauptsächlich durch das Verdampfen der Metallhalogenide, die neben dem Xenon zum Füllgas der Lampe gehören, entstehen. Das Xenon hingegen ist während des Zündvorgangs zu Beginn hauptverantwortlich für die Ionisierung des Gases [32].

Bei LEDs, die ebenfalls zu den nichtthermischen Strahlern zählen, wird ein n- und p-dotiertes Halbleitermaterial zu einem pn-Übergang verbunden. Durch den Kontakt diffundieren die Elektronen als Majoritätsladungsträger des n-dotierten Halbleitermaterials in den Raumbereich des p-dotierten Halbleitermaterials. Für die Löcher ist der Prozess entsprechend umgekehrt. Die Folge sind Raumladungszonen, die ein elektrisches Feld am pn-Übergang erzeugen und der Diffusion entgegenwirken, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Durch das Anlegen einer Vorwärtsspannung rekombinieren die gebildeten Elektronen-Loch-Paare und Licht wird entsprechend der durch das Halbleitermaterial bedingten Bandlücke emittiert, was zu einem schmalbandigen Spektrum führt [97]. Das für den Scheinwerfer notwendige weiße Licht wird durch Lumineszenzkonvertierung [32] des höher energetischen blauen Lichts an einem gelben Phosphor erzeugt. Dieser Prozess wird Stokes-Verschiebung genannt [98] und streckt das Spektrum, wodurch Farbtemperaturen von 5.500 K erreicht werden können [106].

Xenonlampen und LEDs setzen im Fahrzeugbetrieb mit 12 V eine Ansteuerelektronik voraus. Bei Xenonlampen ist eine Zündspannung zwischen 10 kV und 20 kV notwendig, um das Gas zu ionisieren und den Lichtbogen zwischen den Elektroden zu entzünden. Nach der Zündung wird die Lichtquelle bei einer Wechselspannung mit 85 V bei 400 Hz betrieben [97]. Der endgültige Lichtstrom steht erst nach 3 s zur Verfügung [96] und wird durch einen anfänglich erhöhten Anlaufstrom schneller erreicht. Die Leistungsaufnahme liegt zu Beginn bei 75 W und verringert sich im Dauerbetrieb auf 35 W. Die Vorschalt elektronik sorgt für das Zünden der Lampe,

die Erhöhung des Anlaufstroms und die Versorgung im Dauerbetrieb. Spannungsschwankungen des Bordnetzes im Bereich zwischen 9 V und 16,5 V sind durch die Elektronik regelbar [97].

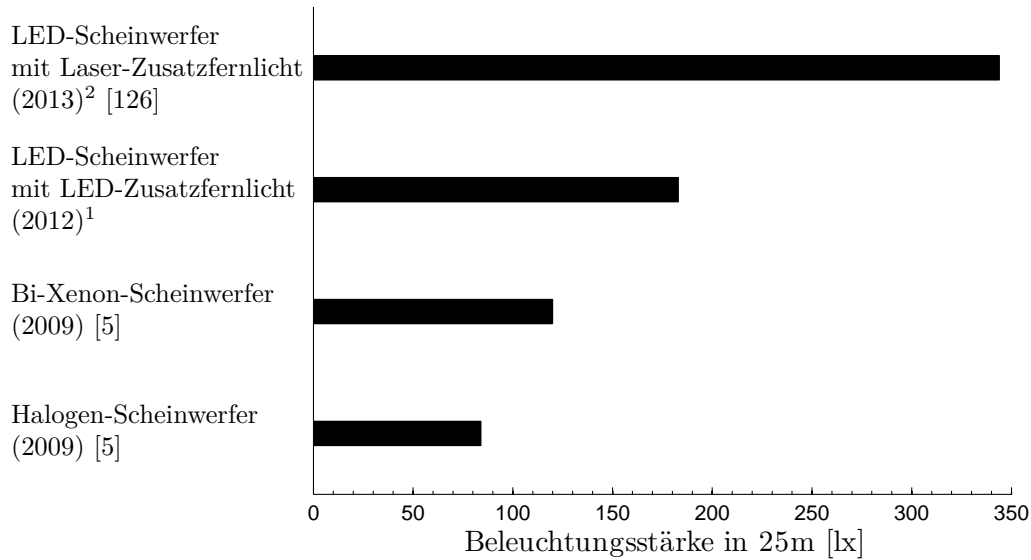


Abbildung 2.4: Darstellung der Steigerung der maximalen Beleuchtungsstärken in 25 m im Fernlicht

Bei LEDs ist ein konstanter Ansteuerstrom notwendig, der durch einen getakteten Stromregler umsetzbar ist und eine Dimmung der LEDs durch Pulsweitenmodulation zulässt [69]. Die Ansprechzeit, bis zu der eine LED ihren vollständigen Lichtstrom erreicht, liegt bei unter 1 ms und ist im Vergleich zu Glühlampen mit 200 ms deutlich kürzer [97]. Bei LED-Scheinwerfern werden Mehrchip-LEDs für die Grundlichtverteilungen eingesetzt, um die notwendigen Lichtströme zu gewährleisten und um zukünftig eine Variation der Lichtverteilung, insbesondere im Bereich der HDG, realisieren zu können [73]. Abbildung 2.4 zeigt die Steigerung der maximalen Beleuchtungsstärke in 25 m durch den Einsatz der vorgestellten Lichtquellen. Bei dem Laserzusatzfernlicht wird ein blauer Diodenlaser verwendet, der durch die angesprochene Lumineszenzkonvertierung an einem gelben Phosphor weißes Licht erzeugt.

¹Porsche Dynamic Light System +, LED-Scheinwerfer mit Zusatzfernlicht, Porsche 911 (991).

²Nach [131] ist für einen Scheinwerfer eine maximal zulässige Gesamtbeleuchtungsstärke von 344 lx in 25 m Entfernung ableitbar.

2.2 Sensorgestützte und prädiktive Lichtfunktionen

Bei den sensorgestützten Lichtfunktionen handelt es sich um Erweiterungen der Grundlichtfunktionen Abblendlicht und Fernlicht. Die automatische Leuchtweitenregulierung, kurz ALWR, und das dynamische Kurvenlicht, kurz DKL, passen die Lichtverteilung der Straßengeometrie an, Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2, wohingegen beim adaptiven Frontbeleuchtungssystem, kurz AFS, und bei der prädiktiven Lichtsteuerung eine Reaktion auf die Geschwindigkeit, die Navigationsdaten und das Wetter erfolgt [112], [128], Abschnitte 2.2.3 und 2.2.4. Die vordefinierten Lichtverteilungen werden der aktuellen Verkehrsszene zugeordnet und sorgen durch eine geometrische Verlagerung oder Veränderung der HDG für eine Verbesserung der Ausleuchtung hinsichtlich Blendung und Erkennbarkeitsentfernung und vermitteln ein erhöhtes Sicherheitsgefühl [54], [72], [99], [124].

2.2.1 Automatische Leuchtweitenregulierung

Bei der ALWR wird die Ausrichtung der HDG durch eine interne Stellmotorik in der Vertikalen verändert. Der notwendige Verfahrwinkel wird aus den Achswerten der Niveausensoren an der Vorder- und der Hinterachse des Fahrzeugs in dem entsprechenden Scheinwerfersteuergerät berechnet und über eine CAN³-Verbindung an den Scheinwerfer gesendet. Die ALWR verhindert die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer, die durch die Beladung und das Beschleunigen des Fahrzeugs hervorgerufen werden kann und gleicht die verringerte geometrische Reichweite durch den auftretenden Nickwinkel bei Bremsmanövern aus. Bei Scheinwerfern mit einem Lichtstrom über 2.000 lm ist das System ebenso gesetzlich vorgeschrieben wie eine Scheinwerferreinigungsanlage [96].

Huhn [54] präsentiert in seiner Arbeit ein Messverfahren, mit dem es möglich ist, die auftretenden Fahrzeugnickwinkel kontinuierlich zu ermitteln. Das Streckenprofil umfasst Stadt-, Land- und Autobahnfahrten. Es werden mehrere Fahrzeuge erfasst, wobei die Nickwinkel zwischen $+1,49^\circ$ und $-1,81^\circ$ liegen [54]. Aus den erfassten Daten errechnet *Huhn* die Zeitspanne, in der der linke Teil der HDG oberhalb des Horizonts liegt und definiert darüber einen Blendanteil je Stunde Fahrzeit für entgegenkommende Fahrzeuge. Die Ergebnisse zeigen innerorts ein Auftreten der Blendung infolge einer Beschleunigung bei durchschnittlich 5 % der Fahrzeit, der maximale Anteil liegt bei 11 %. Außerorts werden weitaus geringere Werte erreicht. *Huhn* identifiziert diesen dynamischen Effekt als Beitragsleister für eine erhöhte Blendung, da in Kombination mit einer Beladung des Kofferraums die Blendung des Gegenverkehrs auf 95 % der Fahrzeit gesteigert wird [54]. *Lehnert* gibt in seiner Arbeit für die Nickwinkel Werte zwischen $+1,6^\circ$ und $-1,4^\circ$ an und unterstreicht die Schwankungen durch den Einfluss der Faktoren Motorleistung und Fahrwerksauslegung [77]. Aus seinen Untersuchungen geht auf der Basis eines Beschleunigungsmanövers ein Blen-

³Controller Area Network.

dimpuls⁴ hervor, der dem 25-Fachen der eigentlich zulässigen Blendung entspricht [77].

Zusätzlich ist eine ALWR im Fall einer Notbremsung unbedingt notwendig, da die geometrische Reichweite von 63,5 m bis 67,5 m durch das Nicken des Fahrzeugs auf 13 m bis 26 m reduziert wird. Jedoch sollte ein entsprechender Regelalgorithmus implementiert werden, der das ständige nervöse Verlagern der HDG verhindert [54].

Kuhl geht in seinen Ausführungen spezifisch auf Straßenkuppen und Straßenwannen ein. Er verdeutlicht den Zugewinn der ALWR hinsichtlich der Blendungsvermeidung gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern auf Kuppen und der Steigerung der Erkennbarkeitsentfernung in Wannen durch die Anpassung der HDG-Ausrichtung an den vertikalen Straßenverlauf [72].

2.2.2 Dynamisches Kurvenlicht

Den Untersuchungen von *Diem* [31] ist zu entnehmen, dass die Fixationsentfernung in Kurven bei Nacht im Vergleich zu geraden Strecken deutlich erniedrigt ist. Geringere Erkennbarkeitsentfernungen sind die Folge. Zusätzlich reichen die peripher aufgenommenen Informationen bei Rechtskurven mit einem Radius von 110 m nicht aus, um eine optimale Spurführung zu gewährleisten [31]. Abhilfe schafft das dynamische Kurvenlicht durch eine Verlagerung der HDG in horizontaler Richtung. Nach *Reif* [96] ist bei Kurvenradien unter 1.000 m eine erhöhte geometrische Reichweite im Vergleich zu einer statischen Abblendlichtverteilung erreichbar, bei Radien um 200 m ist mit einer Steigerung der Reichweite um bis zu 60 % zu rechnen. Ergänzend zu Abschnitt 2.2.1 ist eine korrekte Anpassung der Scheinwerferausrichtung an den horizontalen Straßenverlauf ebenfalls empfehlenswert.

Die Bestimmung der Schwenkwinkel erfolgt auf der Basis der Lenkwinkel-, Gierraten- und Geschwindigkeitsinformation im Scheinwerfersteuergerät und wird wie bei der ALWR durch eine interne Stellmotorik umgesetzt. In Abbildung 2.5 wird das dynamische Kurvenlicht dargestellt. Aus Gründen der Vollständigkeit wird ebenso das statische Kurvenlicht präsentiert. Diese Art des Kurvenlichts kann als Kreuzungslicht angesehen werden, das im Kreuzungsbereich die Seitenbereiche aufhellt.

Die Scheinwerfer werden asynchron angesteuert, was auf Untersuchungen nach *von Hoffmann* [124] zurückgeht. Beim Durchfahren einer Kurve wird der kurven-innere Scheinwerfer mit einem größeren horizontalen Winkel geschwenkt als der kurven-äußere Scheinwerfer. Die Verfahstrategie sieht eine horizontale Verlagerung der HDG zwischen $\pm 7^\circ$ bzw. $\pm 15^\circ$ vor [59].

Aktuelle Erhebungen hinsichtlich der Ausstattungsvarianten bei Neuwagen in Deutschland zeigen für das dynamische Kurvenlicht, das seit 2002 eingesetzt werden darf [59], eine Ausstattungsquote von 15 % [66]. Damit liegt das Lichtsystem im

⁴Die Dauer des Blendimpulses liegt bei 1 s.

Bereich etablierter Ausstattungen, wie Schiebedach (21 %) und elektrischer Sitzverstellung (25 %). Xenon-Scheinwerfer liegen im Neuwagensektor bei einer Quote von 30 % [66]. Allerdings reicht deren Einführung in die Anfänge der 90er-Jahre zurück. In Anbetracht der kurzen Verfügbarkeit des dynamischen Kurvenlichts kann von einer zunehmenden Kundenakzeptanz der Lichtfunktion ausgegangen werden.

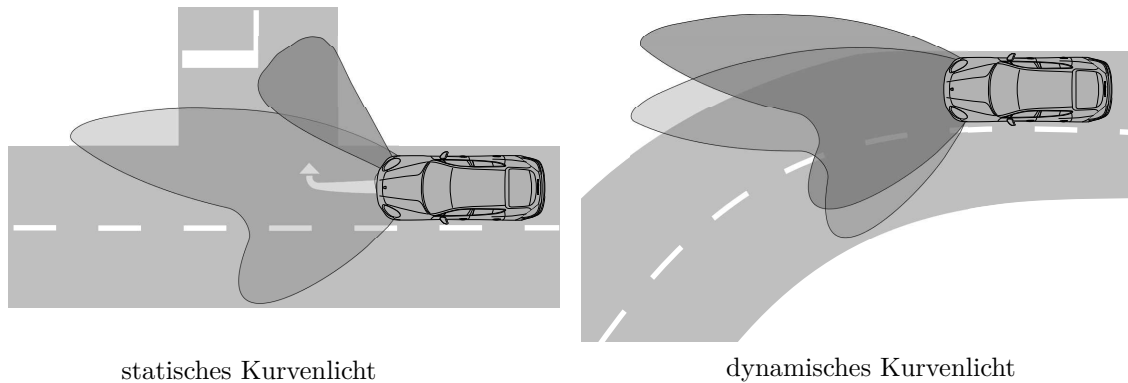


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des statischen und des dynamischen Kurvenlichts auf der Fahrbahn, vergleiche [49]

2.2.3 Adaptives Frontbeleuchtungssystem

Das AFS stellt dem Fahrer neben den Grundlichtverteilungen weitere Lichtverteilungen zur Verfügung, die auf Basis der Geschwindigkeit und der Wetterbedingungen ausgewählt werden. In Abbildung 2.6 wird ein Überblick über die einzelnen Lichtfunktionen gegeben.

Das Abblendlicht wird im Kontext der vordefinierten Lichtverteilungen als Landstraßenlicht bezeichnet. Der Fokus liegt bei dieser Lichtfunktion darin, den rechten Straßenrand weiter auszuleuchten und den Gegenverkehr dabei nicht zu blenden [96]. Das Abblendlicht (Abblendlichtklasse C) wird aktiv, wenn die nachfolgenden Lichtfunktionen inaktiv sind [131].

Beim Stadtlicht (Abblendlichtklasse V) wird die charakteristische Asymmetrie des Abblendlichts durch eine symmetrische HDG ersetzt. Zielführend ist im Stadtverkehr eine breite Ausleuchtung. Die geometrische Reichweite wird zugunsten der Blendungsvermeidung gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern reduziert, da für die notwendige Erkennbarkeitsentfernung die Straßenbeleuchtung ausreichend ist. Der Einsatz des Stadtlichts erfolgt im niedrigen Geschwindigkeitsbereich unter 50 km/h innerorts [128], [131].

Das Autobahnlicht (Abblendlichtklasse E) wird im höheren Geschwindigkeitsbereich über 110 km/h außerorts oder bei baulich getrennten Fahrspuren aktiv [131] und sieht eine Anhebung der HDG um bis zu $0,29^\circ$ sowie eine Erhöhung der Beleuch-

tungsstärke im Hotspot um 20 lx vor⁵ [59]. Die gesteigerte Erkennbarkeitsentfernung wird durch den zunehmenden Bremsweg bei erhöhten Geschwindigkeiten notwendig.

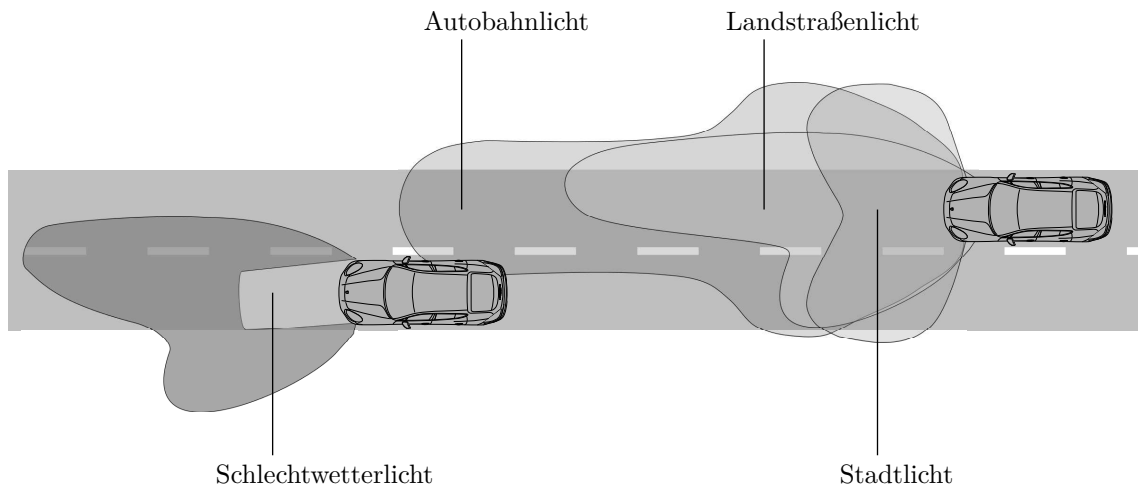


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der AFS-Lichtverteilungen auf der Fahrbahn

Bei schlechtem Wetter wird das Schlechtwetterlicht (Abblendlichtklasse W) genutzt, wobei durch eine breite Lichtverteilung das periphere Sehen, das der Orientierung dient [96], unterstützt wird. Ebenso sorgt eine Verringerung der Beleuchtungsstärke im Vorfeld dafür, dass die Eigenblendung reduziert wird [99]. Die Aktivierung dieser Lichtverteilung wird über den Regenlichtsensor und den dauerhaften Betrieb der Scheibenwischer initiiert [131].

Das Fernlicht ist manuell jederzeit auswählbar oder kann automatisch durch den Fernlichtassistenten, Abschnitt 2.3.2, zugeschaltet werden. Die genannten Funktionen sind in der Lichtschalterstellung Auto verfügbar und können vom Fahrer zu jeder Zeit abgeschaltet werden.

Die Umsetzung der variablen Lichtverteilungen kann gemäß der in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen optischen Systeme erfolgen. Der Einsatz multifunktionaler Projektionsmodule mit den Lichtquellen Xenon oder LED, bei denen an die Stelle der Blende in der Brennebene zwischen Linse und Reflektor eine drehbare Walze oder ein Kulissensystem rückt, ist verbreitet. Die Walze enthält mehrere Konturen, die in den Strahlengang gedreht werden können. Dadurch ist es möglich, die HDG entsprechend den vorgestellten Lichtverteilungen zu formen. Nach dem gleichen Prinzip funktioniert das genannte Kulissensystem. Bei der Umsetzung des Schlechtwetterlichts wird die Lichtverteilung zusätzlich durch zwei Stellmotoren nach außen und nach unten verlagert [96]. Nach *Huhn* [54] verhindert das Divergieren der Scheinwerfer eine Strahlkreuzung, was bei Nebel hohe Leuchtdichten erzeugen kann und störend wirkt.

⁵Die Anhebung der Lichtverteilung um $0,29^\circ$ bezieht sich auf die Längsachse des Scheinwerfers. Die Erhöhung der Beleuchtungsstärke bezieht sich auf eine Entfernung von 25 m.

2.2.4 Prädiktive Lichtsteuerung

Bei der prädiktiven Lichtsteuerung wird für die Auswahl der Lichtfunktionen zusätzlich die Ortsinformation des Navigationssystems berücksichtigt, wodurch eine vorzeitige Anpassung der Lichtverteilung an die Straßengeometrie und den Straßentyp realisierbar ist.

Nach *Lee et al.* [76] ist eine Auswahl der AFS-Lichtverteilungen, Abschnitt 2.2.3, auf Basis der Geschwindigkeitsinformation nicht ausreichend und eine zusätzliche Steuerung über die Navigationsinformation sinnvoll. Die vordefinierten Geschwindigkeiten auf der Autobahn mit 110 km/h können auf der Landstraße ebenfalls erreicht werden, wobei in dieser Situation das Anheben der HDG zu Blendungen für den Gegenverkehr führen kann, da keine bauliche Trennung vorhanden ist. Darüber hinaus werden durch die prädiktiven Streckendaten die Verkehrsrichtung (Rechts- oder Linksverkehr) und Kreuzungen erkannt [15]. Im Kreuzungsbereich werden breite Lichtverteilungen verwendet, um Radfahrer und Fußgänger frühzeitig zu erkennen.

Das dynamische Kurvenlicht, Abschnitt 2.2.2, hat auf Basis der Lenkwinkel- und Gierratensteuerung den Nachteil, dass eine Verlagerung der Lichtverteilung erst in der Kurve erfolgen kann. Nach *Huhn* [54] muss ein optimales Kurvenlicht bereits in einem Entfernungsbereich von 50 m bis 100 m, abhängig von der Geschwindigkeit, vor der Kurve die Ausleuchtung an den horizontalen Straßenverlauf anpassen. In ersten Seriensystemen wird eine vorzeitige Verlagerung des Lichtschwerpunkts auf Basis der Navigationsdaten bereits umgesetzt [16]. Zukünftige Ansätze sehen eine Adaption der Ausleuchtung auf Basis der Manöver- und Trajektorienschätzung vor [90].

Neben der navigationsdatenbasierten Lichtsteuerung eignet sich auch ein Kamerasystem dafür, den Straßenverlauf und den Straßentyp zu erfassen. *Kuhl* sieht über die Ansätze zur Fahrspurerkennung [72] einen Nutzen zur Bestimmung der Straßentopologie und folglich zur Ausleuchtung von Kuppen und Wannen im Verkehrsraum [72]. *Ewerhart* [36] zeigt die Umsetzung eines prädiktiven Kurvenlichts mittels Kamerainformationen.

2.3 Kamerabasierte Lichtfunktionen

Auf Basis der Dynamikparameter, der Navigationsdaten und der Wetterlage ist eine Auswahl definierter Lichtverteilungen möglich. Die Umsetzung einer situativen Ausleuchtung hingegen, die die anderen Verkehrsteilnehmer aktiv berücksichtigt, bedingt ein Kamerasystem, Abschnitt 2.3.1, und eine Erweiterung der optischen Scheinwerferkonzepte, die einen höheren Variationsgrad der Lichtverteilung zulassen. Abhängig von der Güte der Kamerainformationen und dem gewählten Scheinwerfer untergliedern sich die kamerabasierten Lichtfunktionen in die Kategorien Fernlichtassistent, kurz FLA, Abschnitt 2.3.2, gleitende Leuchtweite, kurz GLW, Abschnitt 2.3.3, und blendfreies Fernlicht, Abschnitt 2.3.4.

2.3.1 Kamerasysteme

Die Fahrerassistenzkamera stellt die Objektinformationen zur Verfügung, die für eine situative Lichtsteuerung notwendig sind. Im Kontext der lichtbasierten Fahrerassistenz sind der Objekttyp wie zum Beispiel der Gegenverkehr, der vorausfahrende Verkehr und die Straßenbeleuchtung sowie die Lage der Objekte im Raum relativ zum Fahrzeug von Bedeutung. Grundsätzlich sind Mono- und Stereokamerasysteme einsetzbar, die die genannten Informationen mit einer systembedingten Güte liefern.

Zur Informationsgewinnung wird der für die Kamera erfassbare Bereich des Verkehrsraums in Form von Grauwerten auf dem Kamerabild abgebildet. Hierfür wird ein Array an Photozellen genutzt, das orts aufgelöste Helligkeitsinformationen aufnimmt. Die für den Photoeffekt verwendeten Halbleitertechnologien sind CCD⁶- und CMOS⁷-Sensoren. Ein Technologievergleich ist Tabelle 2.1 zu entnehmen. Auf der Basis des resultierenden Grauwertbilds werden Bildverarbeitungsoperationen angewandt, um die aufgenommenen Szenen zu interpretieren. Im Zuge der Bildverarbeitung wird eine Segmentierung des Kamerabilds, eine Extraktion der vordefinierten Merkmale und eine Klassifikation der detektierten Objekte durchgeführt [44].

Tabelle 2.1: Technologievergleich CCD- und CMOS-Sensor, siehe auch [44]

	CCD-Sensor	CMOS-Sensor
	keine Auswerteelektronik auf aktiver Fläche	Auswerteelektronik auf aktiver Fläche
Bildrauschen	gering	hoch
Blooming ⁸	vorhanden	nicht vorhanden
Auswertung	serielle Auswertung	parallele Auswertung
Dynamik	gering	hoch
Lichtempfindlichkeit	höher, größere aktive Fläche	niedriger, kleinere aktive Fläche

Beim Monokamerasystem werden die Objektinformationen durch die Auswertung eines Kamerabilds oder einer Sequenz an Bildern gewonnen. Durch hinterlegte Symmetrie-Informationen, wie zum Beispiel dem Scheinwerfer- oder dem Heckleuchtenabstand eines Fahrzeugs [79], kann eine Entfernungsschätzung durchgeführt werden und somit eine Bestimmung der relativen Lage der Verkehrsobjekte zum Fahrzeug erfolgen. Ebenso kann die Tiefeninformation durch das Weiterverfolgen eines Objekts (Tracking) über mehrere Kamerasequenzen realisiert werden. Diese Form der Entfernungsschätzung wird als *Motion Stereo* bezeichnet, siehe hierzu [44], [79].

⁶Charge Coupled Device.

⁷Complementary Metal Oxide Semiconductor.

⁸Blooming bezeichnet eine Beeinflussung der Ladungen in benachbarten Kamerapixeln bei sehr hellen Punktlichtquellen.

Die Nutzung von Stereokamerasystemen wird gegenwärtig für Assistenzfunktionen im nahen Entfernungsbereich eingesetzt, wie zum Beispiel dem Notbremsassistenten⁹. Für Lichtfunktionen ist kein Seriensystem bekannt. Generell besteht bei der Stereokamera die Möglichkeit, die Entfernung der Objekte durch die Detektionsrichtungen der zwei Kameras zu bestimmen. Über die bekannte Disparität [85] wird mittels einer Stereoanalyse die Entfernung bestimmt. Dieses Verfahren bedingt eine genaue Ausrichtung beider Kamerasysteme aufeinander sowie eine korrekte Korrespondenzsuche in den beiden Bildern [79].

Die Auflösung der zur Verfügung stehenden Entfernungsangabe wird in Form von Entfernungsklassen angegeben. Beim Fernlichtassistenten, Abschnitt 2.3.2, ist keine Entfernungsschätzung notwendig. Eine Klassifizierung der Objekte ist ausreichend. Bei der gleitenden Leuchtweite, Abschnitt 2.3.3, und bei dem blendfreien Fernlicht, Abschnitt 2.3.4, wird hinsichtlich des Nutzungsgrads der Lichtfunktion eine hohe Anforderung an die Auflösung der Entfernungsschätzung gestellt.

Bei der Kalibrierung der Kamerasysteme werden eine intrinsische und eine extrinsische Kalibrierung [119], [109] durchgeführt. Die intrinsische Kalibrierung bezieht das optische System und die Detektorfläche in den Kalibrierungsprozess mit ein. Grundsätzlich wird eine Kalibriermatrix erzeugt, die jedem Pixel der Kamera einen Winkelbereich zuordnet. Eine extrinsische Kalibrierung sieht die Ausrichtung der Kamera im Fahrzeug vor. In der Produktionslinie eines Automobilherstellers wird diese Ausrichtung standardmäßig über eine Messtafel im definierten Abstand durchgeführt. Während der Fahrt erfolgt eine zusätzliche Onlinekalibrierung, die Langzeiteffekte wie beispielsweise die Verformung der Scheibe, das Setzverhalten der Kamera und ladungsbedingte Lageänderungen der Karosserie ausgleicht.

2.3.2 Fernlichtassistent

Der FLA kann auf jedes Scheinwerfersystem adaptiert werden, da lediglich eine automatische Aktivierung des Fernlichts erfolgt. Die Entscheidungsfindung hin zur Fernlichtaktivierung sowie die Integration und die Applikation der Sensorik im Fahrzeug bilden den weitaus komplizierteren Part und unterliegen harten Anforderungen.

Eine Klassifizierung der definierten Objekte im Verkehrsraum muss gewährleistet sein. Das Fernlicht ist allgemein innerhalb geschlossener, beleuchteter Ortschaften und bei vorausfahrendem oder entgegenkommendem Verkehr zu deaktivieren. Die Sensorik muss an die Frontscheibenneigung, den Scheibentransmissionsgrad und die Scheinwerfermerkmale angepasst sein. Im Kontext der länderspezifischen Straßencharakteristika, wie zum Beispiel den reflektierenden Folien der Schilder, müssen die Applikationen den Erfordernissen angepasst werden [127].

An dieser Stelle sei beispielhaft auf die Funktionsweise eines Systems hingewiesen, dass eine CMOS-Kamera mit einem Sichtbereich von 40° horizontal und 13° vertikal bei einer Pixelauflösung von 293×248 Pixeln nutzt und einen Dynamikbereich

⁹Notbremsassistent: Hierbei wird unter anderem durch das Kamerasystem eine automatische Notbremsung eingeleitet.

hinsichtlich der Intensität von 90dB¹⁰ umfasst. Durch den erhöhten detektierbaren Intensitätsbereich werden sowohl Heckleuchten vorausfahrender Verkehrsteilnehmer in großer Entfernung als auch Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge erkannt. Zur Merkmalsextraktion, die für die Klassifizierung des Objekts notwendig ist, werden die Intensität, die Farbe¹¹, die Geschwindigkeit und die Position des Objekts im Bild berücksichtigt. Der Detektionsbereich der Kamera liegt bei 1.000 m, wobei ab 400 m Entfernung eine Erfassung der Verkehrsteilnehmer möglich ist [127].

Nach einer Studie von *Sprute et al.* [113] kann die Fernlichtnutzung durch die Unterstützung von lichtbasierten Assistenzsystemen, bei Verkehrsdichten zwischen 50 und 100 entgegenkommender Fahrzeuge je Stunde verdoppelt werden, ohne dabei eine signifikante Risikoüberhöhung durch die verbesserte Ausleuchtung zu provozieren. Die verringerte Nutzung des Fernlichts durch eine manuelle Regelung liegt in einem der identifizierten Fehlertypen begründet, bei dem das Fernlicht nicht benutzt wird, obwohl kein entgegenkommender Verkehrsteilnehmer durch eine mögliche Blendung gefährdet ist [113]. Ein zu spätes Abblenden, wodurch eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer erfolgt, kommt im Vergleich zum vorzeitigen Abblenden in weitaus weniger Fällen vor [113]. Die Ursache dieses Verhaltens ist auf die Befürchtung des Fahrers, andere Verkehrsteilnehmer zu blenden, zurückzuführen [114]. Rechtlich ist der Fernlichtassistent eine Komfortfunktion, da der funktionale Umfang der Beleuchtungsanlage nicht erweitert wird [112].

2.3.3 Gleitende Leuchtweite

Die GLW ist in der Literatur auch als adaptive HDG bekannt [59]. Die Zielsetzung der Lichtfunktion ist es, die vertikale Lage der HDG an den vorausfahrenden oder entgegenkommenden Verkehr anzupassen, Abbildung 2.7. Dabei wird über ein Kamerasystem den Objekten im Verkehrsraum eine relative Lage zum Fahrzeug zugeordnet, wobei die Güte der Lagebeziehung abhängig von der Größe der Entfernungsklassen und der Qualität der Entfernungsschätzung ist, Abschnitt 2.3.1. Unter Verwendung der Objektinformation wird die mögliche vertikale Verlagerung des Scheinwerfers, die eine Blendung vermeidet und eine erhöhte Erkennbarkeitsentfernung ermöglicht, berechnet. Die HDG wird entsprechend diesem Wert nachgeregelt. Für den Fall, dass keine anderen Verkehrsteilnehmer im Detektionsbereich der Kamera sind, aktiviert das System entsprechend dem Fernlichtassistenten, Abschnitt 2.3.2, das Fernlicht.

Die Verlagerung der HDG kann einerseits durch die interne Stellmotorik mit der ALWR, Abschnitt 2.2.1, umgesetzt werden. Andererseits besteht die Möglichkeit, das Walzensystem der AFS-Lichtverteilungen, Abschnitt 2.2.3, zu nutzen. Gegenüber den AFS-Scheinwerfern wird bei den GLW-Scheinwerfern die Anzahl der Konturen und somit die Anzahl der vordefinierten Lichtverteilungen vergrößert, wodurch ein nahezu kontinuierlicher Übergang zwischen Abblendlicht und Fernlicht möglich ist.

¹⁰Der Dynamikbereich umfasst einen Wertebereich von 10⁹.

¹¹Für die Farberkennung ist in einem Array mit vier Photozellen eine rot-sensitive Photozelle vorhanden.

Das Walzensystem bietet im Vergleich zum ALWR-Stellmotor den Vorteil, eine adaptive Anpassung der HDG zu ermöglichen, ohne das Vorfeld zu beeinflussen.

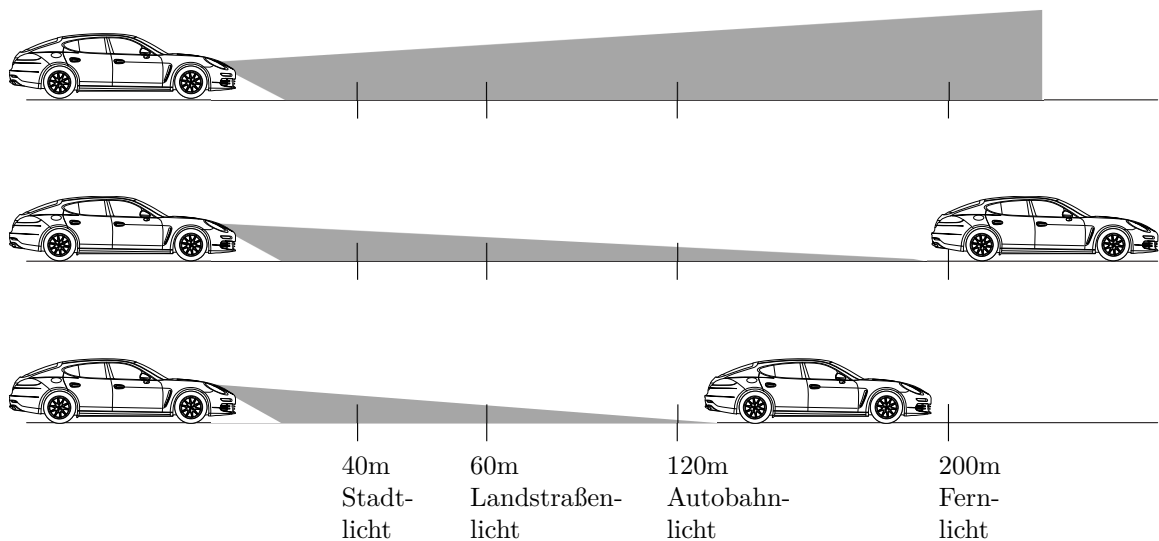


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der gleitenden Leuchtweite zur vertikalen Anpassung der Hell-Dunkel-Grenze, vergleiche [49], [48]

Im Vergleich zum Fernlichtassistenten werden erhöhte Anforderungen an das optische System des Scheinwerfers und den Informationsgehalt des Kamerasystems gestellt. Mit Blick auf den Nutzungsgrad der jeweiligen Lichtfunktion kann von einer Steigerung der Ausleuchtungsqualität gesprochen werden. *Böhm et al.* zeigen in ihrer Veröffentlichung den Nutzungsgrad eines GLW-Systems im Vergleich zur manuellen Fernlichtnutzung und geben eine Erhöhung der Fernlichtnutzung von 19,1 % auf 50,6 % an [22]. Diese Steigerung ist mit der Nutzung eines Fernlichtassistenten gleichzusetzen. Interessant ist die Verringerung der reinen Abblendlichtnutzung auf 12,9 %, wodurch für die restlichen 36,5 % der Verkehrssituationen eine adaptive Lichtverteilung mit erhöhter Erkennbarkeitsentfernung zur Verfügung steht.

2.3.4 Blendfreies Fernlicht

Das blendfreie Fernlicht stellt bei den kamerabasierten Lichtfunktionen die größten Anforderungen an die Objektklassifizierung und deren Positionsschätzung relativ zum Fahrzeug. Die grundlegende Funktion dieses Lichtsystems ist die dauerhafte Nutzung des Fernlichts durch die individuelle Entblendung vordefinierter Objekte im Verkehrsraum. *Kauschke* [60] und *Roslak* [100] zeigen mit ihren Arbeiten die Möglichkeiten blendfreier Fernlichtsysteme auf und legen den Grundstein für zukünftige Seriensysteme.

In der aktuellen Serienumsetzung sind sowohl Xenon-Systeme als auch LED-Systeme zu finden. Bei den blendfreien Xenon-Systemen wird, bedingt durch die Einzellichtquelle, das durch die AFS- und die GLW-Scheinwerfer bekannte Prinzip mittels der

definierten Walzenkonturen in Kombination mit einem Projektionsmodul verwendet. Die Mantelflächen der Walzen erzeugen für den linken und rechten Hauptscheinwerfer gespiegelte Teilfernlichtverteilungen, die durch die Nutzung der vertikalen und horizontalen Stellmotorik asynchron verlagert werden können. Das maskierte Dauerfernlicht, kurz MDF, generiert eine Ausblendung in der Scheinwerferlichtverteilung, wenn beide Scheinwerfer zusammen betrachtet werden. Der Vorteil dieses Systems ist eine Anpassung des Schattens an die Objekte im Verkehrsraum. Als nachteilig wird die ständige Verlagerung der gesamten Lichtverteilung durch die Anpassung des Schattenbereichs angesehen, die bei Kurvenfahrten und im Bereich des Vorfeldes als störend empfunden wird. Ebenso muss angemerkt werden, dass im Seitenbereich im Fall einer Maskierung auf Basis der grundlegenden Teilfernlichtverteilungen kein volles Fernlicht zur Verfügung steht [55], [40]. Zusätzlich besteht mit dieser Umsetzung des blendfreien Fernlichts nur die Möglichkeit, eine Entblendung zu generieren, was bei erhöhtem Verkehrsaufkommen zu einem sehr großen dunklen Bereich führen kann [40]. Eine teilweise Verbesserung des vorgestellten mechanischen und optischen Ansatzes kann durch eine modulare Trennung zwischen der Ausleuchtung für das Vorfeld und für die Reichweite erfolgen, wodurch die hohe Dynamik im Vorfeld verringert wird. In dieser Umsetzungsvariante werden die Teilfernlichtverteilungen mit dem Reichweiten-Modul (Spot-Modul) erzeugt. Aufgrund der modularen Aufteilung empfiehlt sich in diesem Fall der Einsatz von LEDs.

Eine weitere Ausprägung blendfreier Fernlichtsysteme ist durch ein Matrixbeam-System, kurz MXB-System, möglich. Hierbei wird der Verkehrsraum durch vordefinierte LED-Segmente ausgeleuchtet, was eine selektive Entblendung mehrerer Verkehrsteilnehmer ermöglicht. Die diskretisierte Ausleuchtung kann über mehrere Reflektormodule oder Linsenmodule erzeugt werden, die jeweils mehrere LEDs als Lichtquellen nutzen. Im Audi A8 (Baujahr 2013) wird das blendfreie Fernlicht durch fünf Reflektormodule mit je fünf LEDs erzeugt [16], wodurch eine horizontale Auflösung von $1,2^\circ$ ermöglicht werden kann. Im Zuge des Verbundprojekts „SEEL“¹² wird ein Konzeptscheinwerfer mit fünf einzelnen Matrixmodulen mit je zwanzig LEDs verwendet [37]. Die Matrixmodule nutzen eine Projektionslinse und bilden das Lichtbild einer Primäroptik ab [37]. Die Primäroptik und die achromatische Linse reduzieren die Farbeffekte und erzeugen scharfe Abgrenzungen der einzelnen Pixel [88]. Die Anordnung der Matrixmodule kann beliebig ausgelegt werden und ermöglicht dadurch neben der bekannten horizontalen auch eine vertikale Segmentierung der Lichtverteilung im Verkehrsraum. In Abbildung 2.8 wird das Grundprinzip blendfreier Fernlichtsysteme in den Ausprägungen MDF und MXB gezeigt.

Durchgeführte Untersuchungen zeigen im Vergleich zum FLA und zur GLW den Zugewinn durch blendfreie Fernlichtsysteme. *Hummel* setzt sich in seiner Arbeit mit dem Nutzungsgrad einzelner Lichtsysteme auseinander, indem er den durchschnittlichen Anteil des situativ genutzten Lichtstroms im Verhältnis zum kompletten Lichtstrom des Scheinwerfersystems für Normverkehr betrachtet [55]. Nach seiner Simulation wird mit einer durchschnittlichen Verkehrsdichte von 242 Fahrzeugen pro Stunde beim Fernlichtassistenten mit 69,16 % und bei der gleitenden Leuchtweite mit 76,15 % ein geringerer Nutzungsgrad im Vergleich zu blendfrei-

¹²Europäisches Forschungsprojekt „SEEL“ (Solutions for Energy Efficient Lighting).

en Fernlichtsystemen erreicht. Das MDF-System mit Teilfernlichtverteilung erzielt einen Nutzungsgrad von 85,07 % und liegt damit knapp hinter dem MXB-System mit 89,8 % und 91,38 % [55].

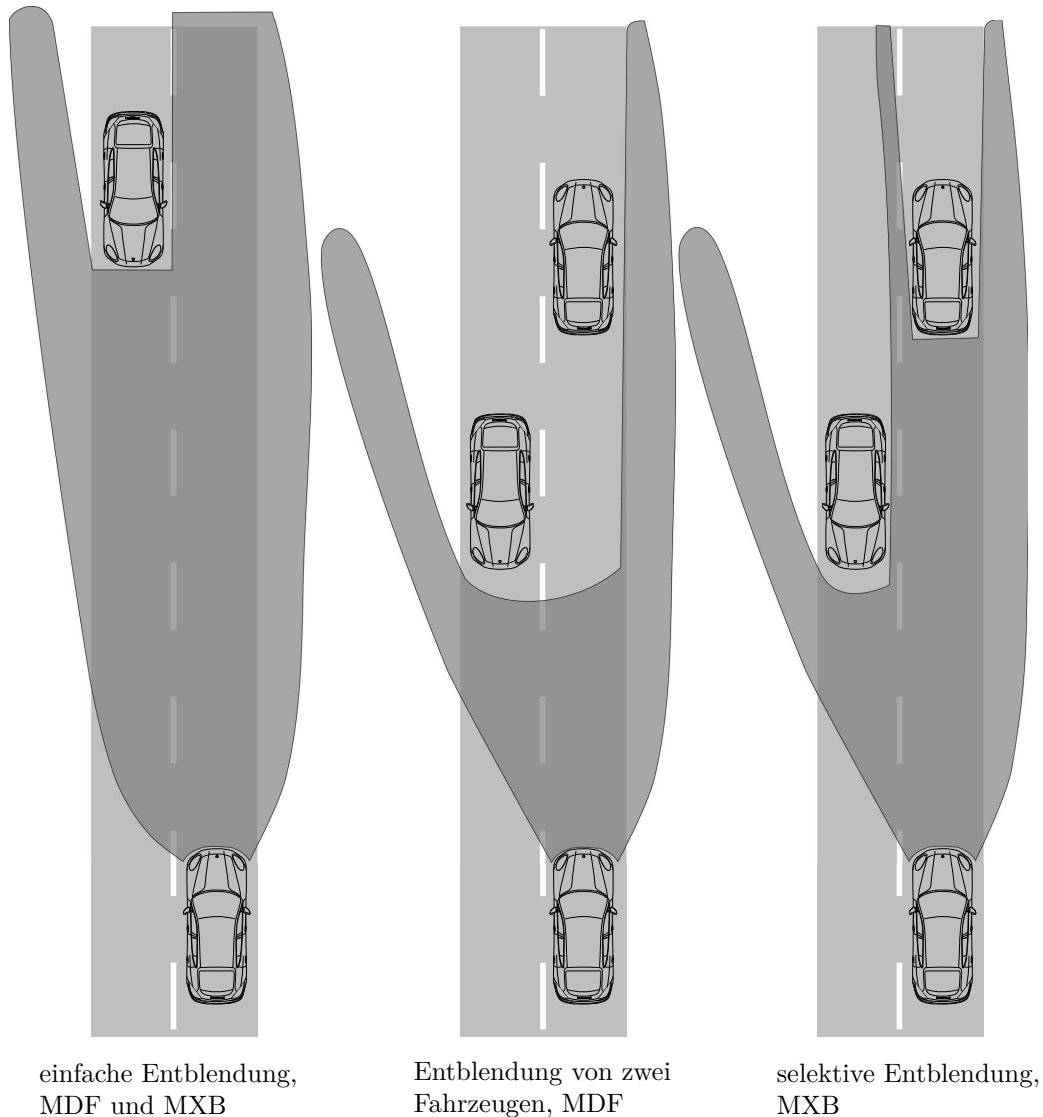


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Entblendung von Verkehrsteilnehmern durch ein MDF-System und durch ein MXB-System, [48]

Austerschulte et al. [8] stellen die horizontale Verteilung der erfassten Schattenzentren für blendfreie Fernlichtsysteme dar und identifizieren Verkehrssituationen mit vorausfahrendem Verkehr als einer der häufigsten Anwendungsfälle für Lichtsysteme. Eine anschließende Simulation, die die Einschaltdauer je Lichtsegment bei einer Verkehrsdichte von 3,1 Fahrzeugen pro Kilometer erfasst, zeigt bei MXB-Systemen mit unterschiedlichen horizontalen Auflösungen im Vergleich zum Fernlichtassistenten eine erhöhte Aktivierungsrate im Zentrum der Lichtverteilung sowie eine stark erhöhte Aktivierungsrate in den Seitenbereichen. Nach Aussage der Autoren liegt die optimale Segmentbreite im Bereich zwischen 1° und 2° [8].

Zusammenfassend deuten die Untersuchungen darauf hin, dass dem Fahrer durch die Nutzung von Lichtassistentenfunktionen bei korrekt eingestellten Scheinwerfern mehr Licht im nächtlichen Straßenverkehr zur Verfügung steht und die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer reduziert werden kann.

2.4 Scheinwerfereinstellung

Nach der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, kurz StVZO, müssen Scheinwerfer einstellbar sein [25]. Die Einstellung der Hauptscheinwerfer ist in der Produktionslinie eines Automobilherstellers bei jedem Scheinwerfer mindestens einmal durchzuführen. Bei der Ausrichtung des Abblendlichts wird die horizontale und die vertikale Orientierung des Scheinwerfers auf Basis des H0V0-Punkts der HDG so ausgerichtet, dass die gesetzlichen Rahmenbedingungen erfüllt werden. Im Geltungsbereich der ECE¹³ ist dies nach [132] geregelt. Grundsätzlich ist die HDG eines herkömmlichen Abblendlichts am H0V0-Punkt um $0,57^\circ$ gegenüber der Fahrzeuglängsachse nach unten einzustellen, Abbildung 2.9. Nachfolgend wird der Prozess der Scheinwerfeinstellung nach dem heutigen Stand der Technik aufgezeigt, Abschnitt 2.4.1. Anschließend werden empirisch ermittelte Daten im Zuge der Scheinwerfereinstellung dargestellt, Abschnitt 2.4.2.

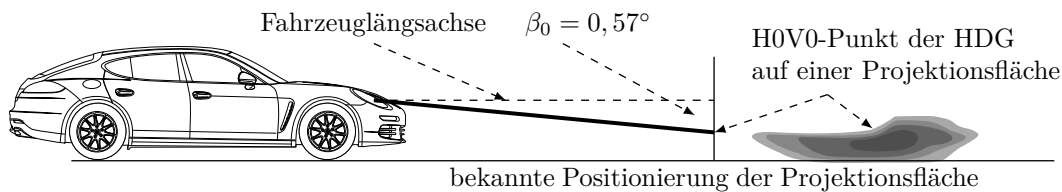


Abbildung 2.9: Darstellung der Scheinwerfereinstellung an einer Projektionsfläche

2.4.1 Manuelle und kamerabasierte Lichteinstellung

Die Lichteinstellung betrifft im einfachsten Fall die Einstellung des Abblendlichts. Bei Scheinwerfersystemen mit einem zusätzlichen Vorfeldmodul muss dessen Orientierung zum eingestellten Abblendlicht passen. Dieser Prozess wird vom Scheinwerferhersteller vorab durchgeführt. Umfasst das Frontbeleuchtungssystem einen Nebelscheinwerfer, muss auch dieser entsprechend ausgerichtet werden. Beinhaltet das Scheinwerfersystem die in den Abschnitten 2.2 und 2.3 vorgestellten Lichtfunktionen, muss im Zuge der Scheinwerfereinstellung eine Funktionsprüfung durchgeführt werden. Heutige kamerabasierte Scheinwerfereinstellgeräte decken die genannten Punkte ab und bilden dadurch die Grundlage für eine optimale Nutzung der Lichtfunktionen [82]. Jedoch sind entsprechende Einstellportale [121] lediglich in der Produktionslinie zu finden. In Werkstätten wird hauptsächlich mit einfachen Lichteinstellgeräten gearbeitet, die in den meistens Fällen nur eine manuelle Einstellung

¹³Economic Commission of Europe.

des Hauptscheinwerfers auf Basis der Abblendlichtverteilung und des Nebelscheinwerfers ermöglichen.

Manuelle Lichteinstellung: Das Lichteinstellgerät ist ein Lichtsammelkasten, der über eine Fresnel-Linse die Abblendlichtverteilung des Scheinwerfers auf einer Mattscheibe im Inneren des Geräts abbildet. Die abgebildete Abblendlichtverteilung entspricht einer Lichtverteilung in 10 m Entfernung auf einer Projektionsfläche. Auf der Mattscheibe ist ein Fadenkreuz angebracht, das die optimale Scheinwerferposition anzeigt. Dieses Fadenkreuz kann über ein Drehrad am Lichteinstellgerät in der Vertikalen verändert werden, sodass die vertikale Ausrichtung des Scheinwerfers auf definierte Winkelwerte eingestellt werden kann. Der Einstellwinkel des Scheinwerfers ist von dessen Anbauhöhe im Fahrzeug abhängig [131].

Bei der manuellen Lichteinstellung wird das Lichteinstellgerät von einer Person vor dem Scheinwerfer positioniert. Die Positionierung umfasst eine Anpassung der optischen Achse des Einstellgeräts an die Längsachse des Fahrzeugs, was durch eine Drehung des Lichteinstellgeräts vor dem Fahrzeug erreicht werden kann. Ein Positionierlaser am Lichtsammelkasten ermöglicht die notwendige Ausrichtung. Das Lichteinstellgerät ist auf Schienen vor dem Fahrzeug gelagert. Durch die Drehbewegung werden nur die Fresnel-Linse und der Lichtsammelkasten mit der Mattscheibe bewegt. Des Weiteren wird die Höhe der optischen Achse des Lichteinstellgeräts an die Anbauhöhe des Scheinwerfers angepasst.

Nach der Ausrichtung wird die vorgeschriebene vertikale Neigung des Scheinwerfers über das Drehrad eingestellt. Eine Person überprüft im Anschluss die Lage der HDG und verdreht den Scheinwerfer, falls notwendig, an den Einstellschrauben¹⁴ so, dass der HOV0-Punkt der HDG mit dem Fadenkreuz übereinstimmt. Die Beurteilung der HDG sowie die Positionierung des Lichteinstellgeräts vor dem Scheinwerfer erfolgen subjektiv. Der beschriebene Einstellprozess wird im Folgenden als visuell-manuelle Methode bezeichnet.

Kamerabasierte Lichteinstellung: Die kamerabasierte Lichteinstellung deckt neben der Abblendlichteinstellung auch die Prüfung anderer Lichtfunktionen ab. Das Lichteinstellgerät wird durch eine Kamera mit CMOS-Technik erweitert. Die Kamera erfasst die Abblendlichtverteilung, die sich auf der Mattscheibe des Lichteinstellgeräts abbildet. In Abstimmung mit den führenden Automobilherstellern sind für die Lagebestimmung der HDG verschiedene Algorithmen hinterlegt, die eine objektive Bewertung des jeweiligen Scheinwerfertyps ermöglichen [83]. Die subjektive Bewertung der HDG wird durch diese Vorgehensweise ersetzt. In der Produktionslinie werden die Abweichungen zur vordefinierten Ausrichtung des Scheinwerfers auf einem externen Bildschirm visualisiert. Über einen veränderlichen Signalton wird ein Annähern an die optimale Einstellung im Zuge einer Drehung an den Einstellschrauben des Scheinwerfers signalisiert.

¹⁴An dem Scheinwerfer befinden sich zwei Einstellschrauben zur Durchführung der horizontalen und der vertikalen Grundeinstellung.

Neben dem standardisierten Bewertungsprozess der HDG wird bei dieser Art der Lichteinstellung auch die Positionierung der Messtechnik vor dem Scheinwerfer verbessert. In der Produktionslinie werden die bereits erwähnten Einstellportale genutzt, die eine optimale Ausrichtung des Fahrzeugs vor dem Lichteinstellgerät zur Folge haben. Die Vorgaben in der Produktion für die Einstellgenauigkeit liegen zwischen $\pm 0,1\%$ ¹⁵ und $\pm 0,2\%$ ¹⁶.

2.4.2 Statistische Befunde zur Scheinwerferfehlstellung

Die statistischen Befunde zur Scheinwerfereinstellung werden unter zwei Gesichtspunkten betrachtet. Zum einen wird der allgemeine Einstellzustand der Scheinwerfer im Feld analysiert, zum anderen werden die Einstellgenauigkeiten der jeweiligen Einstellmethoden dargestellt.

Allgemeiner Einstellzustand im Feld: Fundierte Aussagen zur Quote falsch eingestellter Scheinwerfer ermöglicht der jährlich im Oktober in Deutschland durchgeführte *Lichttest*¹⁷. Ziel der Untersuchung ist es, die Wahrnehmung der Autofahrer im Kontext einer funktionierenden Fahrzeugbeleuchtung zu schärfen.

Die Ergebnisse zeigen für das Jahr 2012 bei 40 % der Haupt- und Nebelscheinwerfer eine Fehlstellung. Im Vergleich hierzu ist die Quote der Fahrzeuge mit Lichtdefekten bei der Frontbeleuchtung mit 6,7 % deutlich geringer. Vonseiten des Allgemeinen Deutschen Automobil-Club e. V., kurz ADAC, wird zu einer kontinuierlichen Kontrolle der Scheinwerfereinstellung bei einem Lampenwechsel geraten [1].

Mit Fokus auf die Hauptscheinwerfer knüpfen die Ergebnisse des *Lichttests* 2013 nahtlos an die Ergebnisse des *Lichttests* 2012 an. Als zu hoch eingestellt werden 10,5 % der Scheinwerfer beurteilt. Im Vergleich zum Vorjahr mit 13,3 % ist dies eine minimale Verbesserung. Die Quote der zu tief eingestellten Scheinwerfer liegt bei 8,6 %. Insgesamt basiert die Statistik auf 155.000 untersuchten Fahrzeugen [67].

Ein Blick auf die Testergebnisse zwischen 2001 und 2012, Abbildung 2.10, zeigt, dass der Anteil der zu hoch eingestellten Scheinwerfer nahezu konstant über 10 % liegt. Während sich bei der Scheinwerfereinstellung in diesem Zeitraum keine Verbesserung abzeichnet, steigt der Anteil innovativer Lichtfunktionen, Abschnitte 2.2 und 2.3, deutlich. In Abbildung 2.10 ist hierfür beispielhaft die prozentuale Zunahme an Fahrzeugen mit dynamischem Kurvenlicht gezeigt. Nach *Amsel et al.* [4] ist hinsichtlich der Scheinwerfersysteme bis 2015 mit einem Anteil der adaptiven Lichtsysteme von über 33 % zu rechnen. Das Grundproblem der richtigen Scheinwerfereinstellung bleibt jedoch bestehen.

Eine Kontrolle der seitlichen Einstellung wird in den Untersuchungsergebnissen nicht geführt, ebenso sind keine Informationen zu der Dimension der Verstellung bekannt.

¹⁵Entspricht einer Einstellgenauigkeit von $\pm 0,057^\circ$.

¹⁶Entspricht einer Einstellgenauigkeit von $\pm 0,115^\circ$.

¹⁷Der *Lichttest* wird seit 1956 jährlich im Oktober durchgeführt und vom Deutschen Kraftfahrzeuggewerbe und der Deutschen Verkehrswacht organisiert [68].

Berücksichtigt werden muss, dass einer qualitativen Untersuchung der Scheinwerfereinstellung auf Basis objektiver Methoden in den Werkstätten nicht vollständig nachgekommen werden kann. Es ist anzunehmen, dass der Prozentsatz der verstellten Scheinwerfer noch höher liegt.

Untersuchungen nach *Sivak et al.* [111] untermauern die getroffene Annahme. Hierbei werden aus einer Stichprobe von 786 Fahrzeugen Standardabweichungen von $0,55^\circ$ für die horizontale Einstellung und von $0,65^\circ$ für die vertikale Einstellung festgestellt. Die Aussagen zu der vertikalen Einstellung müssen allerdings relativiert werden, da hier die Fahrzeuge in beladenem Zustand vermessen werden. Es werden keine Aussagen zum Anteil der Scheinwerfer mit ALWR getroffen. Jedoch zeigt die Untersuchung, dass auch die horizontale Einstellung zu beachten ist. In [38] wird eine Zusammenstellung weiterer Studien angegeben, wobei die Standardabweichungen für die vertikale Scheinwerfereinstellung zwischen $0,65^\circ$ und $0,90^\circ$ liegen.

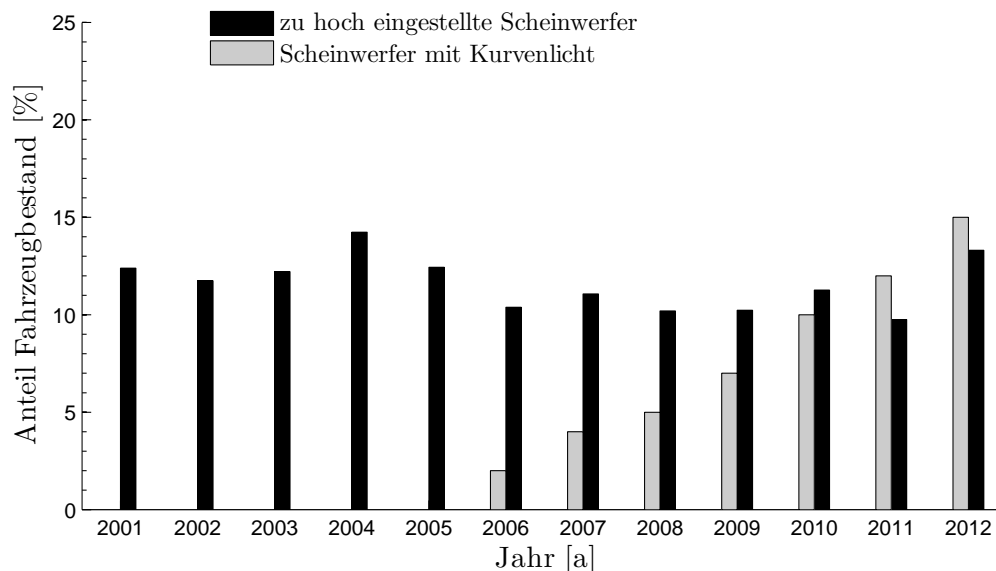


Abbildung 2.10: Prozentuale Entwicklung der Fahrzeuge mit zu hoch eingestellten Scheinwerfern gegenüber Fahrzeugen mit dynamischem Kurvenlicht [66], [65], [64], [20], [19], [18]

Allgemeine Einstellgenauigkeit: Die Einstellgenauigkeit kann als Unsicherheit der Scheinwerfereinstellung verstanden werden. Unter der Annahme einer Normalverteilung ist aus der Standardabweichung die Einstelltoleranz bestimmbar¹⁸. Die Standardabweichungen, die bei der Scheinwerfereinstellung auftreten, sind der Literatur entnommen [95], [39] und [110] und werden im Zuge subjektiver sowie objektiver Untersuchungen unter unterschiedlichsten Einflussfaktoren erhoben. Die Ein-

¹⁸Unter der Annahme einer Normalverteilung liegen 95,4 % der Messergebnisse im Intervall $\mu \pm 2\sigma$ und 99,7 % im Intervall $\mu \pm 3\sigma$. Im Folgenden werden die Ausdrücke $\sigma_{95\%}$ und $\sigma_{99\%}$ genutzt. Die entsprechenden Toleranzangaben sind für 95,4 % bzw. für 99,7 % der jeweiligen Messwerte zu sehen.

flussfaktoren umfassen den Gradienten an der HDG, die Umgebungshelligkeit und das genutzte Scheinwerfersystem.

Nach *Pollack* sind durch veränderliche Umgebungsbedingungen Standardabweichungen zwischen $0,045^\circ$ und $0,09^\circ$ für eine vertikale Einstellung des Scheinwerfers realistisch [95]. Ergänzend zeigen weitere Untersuchungen *Pollacks*, dass objektive Methoden zur Bestimmung der vertikalen Einstellung vergleichbare Ergebnisse zu der von ihm durchgeführten Probandenstudie¹⁹ aufweisen [95]. Eine objektive Beurteilung scheint erstrebenswert, da die Bestimmung der Einstellung dadurch standardisiert werden kann [95].

Ein entscheidendes Kriterium für die Einstellgenauigkeit ist der Gradient an der HDG. Nachfolgende Studien [39], [110] und [95] nutzen eine subjektive Bewertung der HDG in Form von Probandenstudien zur Erhebung der Daten. Nach *Flannagan et al.* sind Standardabweichungen zwischen $0,3^\circ$ und $0,093^\circ$ für unterschiedliche HDG-Gradienten möglich, wobei dieser Studie zufolge Scheinwerfer aus dem Zuständigkeitsbereich der SAE²⁰ und der ECE untersucht werden [39]. Mit Fokus auf Scheinwerfer in Europa liegen die Standardabweichungen der Stichproben zwischen $0,162^\circ$ und $0,093^\circ$ für die vertikale Einstellung, da die europäischen Scheinwerfer eine schärfere HDG aufweisen [39]. *Sivak et al.* kommen zu ähnlichen Ergebnissen, wobei die Scheinwerfer im Zulassungsbereich der ECE bei Probandenstudien Standardabweichungen von $0,18^\circ$ und $0,08^\circ$ aufzeigen [110]. Abgeleitet werden kann eine Beziehung zwischen Schärfe und Einstellgenauigkeit [110]. Die Aussagen werden von *Pollack* gestützt [95].

Grundsätzlich kann unter Berücksichtigung bestehender Untersuchungen für die vertikale Einstellung eine Standardabweichung von $0,1^\circ$ angenommen werden. Für eine horizontale Einstellung sind der Literatur keine vergleichbaren Studien subjektiver bzw. objektiver Untersuchungen zu entnehmen. Ein zu hoch oder zu niedrig eingestellter Scheinwerfer liegt demnach unter der Annahme einer Normalverteilung in 95,4 % der Fälle vor, wenn die gemessene Scheinwerferausrichtung mehr als $\pm 0,2^\circ$ von der Soll-Lage abweicht.

¹⁹Unsicherheit der vertikalen Einstellung $\pm 0,073^\circ$ bei H4-Scheinwerfer für 95 % der Fälle.

²⁰Society of Automotive Engineers.

2.5 Einfluss der Scheinwerferausrichtung auf die Lichtfunktionen

Die vorgestellten Lichtfunktionen, Abschnitte 2.2 und 2.3, sowie die Abblendlichtverteilung, Abschnitt 2.1.1, ermöglichen bei einer korrekten geometrischen Ausrichtung des Hauptscheinwerfers eine hohe Erkennbarkeitsentfernung für den Fahrer bei gleichzeitiger geringer Blendung gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern.

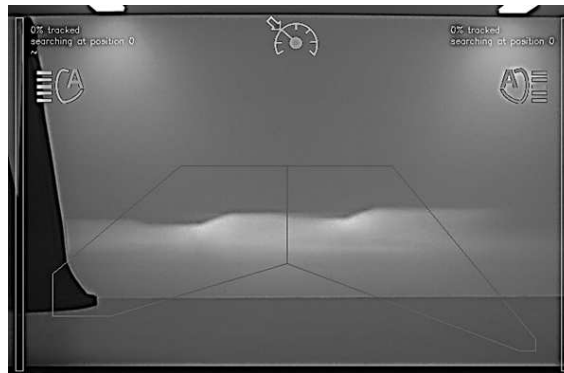


Abbildung 2.11: Bild der Fahrerassistenzkamera mit einem dejustierten rechten Scheinwerfer

Untersuchungen zur Blendung im nächtlichen Straßenverkehr auf der Basis dejustierter Scheinwerfer zeigen, dass eine Beleuchtungsstärke von 1,5 lx am Fahrerauge des entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers²¹ die Sehleistung auf 40 % im Vergleich zur Sehleistung bei einem korrekt eingestellten Scheinwerfer verringert. Die angegebene Blendbeleuchtungsstärke stellt einen realistischen Wert im nächtlichen Straßenverkehr dar [81], [80]. *Sprute* mahnt in seinen Untersuchungen zur Vorsicht bei der Interpretation von Beleuchtungsstärkewerten im Verkehrsraum. Aus seiner Sicht ist nicht zweifelsfrei eine hohe Beleuchtungsstärke mit einer Fernlichtnutzung gleichzusetzen. Hauptscheinwerferfehlerstellungen können ähnliche Ergebnisse hervorrufen. Daraus abgeleitete Aussagen zum Nutzungsverhalten von Fernlichtsystemen können verfälscht sein [112]. In Abbildung 2.11 sind die Lichtverteilungen zweier Scheinwerfer in 10 m Entfernung zu einer Projektionsfläche dargestellt, wobei der rechte Scheinwerfer zu hoch eingestellt ist.

Bei blendfreien Fernlichtsystemen wird die Abstrahlcharakteristik des Scheinwerfers im Lichtalgorithmus²² hinterlegt. Eine horizontale Fehlstellung der Scheinwerfer kann zu einer Blendung des Gegenverkehrs führen, da in dem Lichtalgorithmus von einer korrekten Scheinwerfereinstellung ausgegangen wird, Abbildung 2.12. Die Einstellprozesse der verschiedenen Scheinwerfermodule zueinander und die Grundeinstellung des gesamten Scheinwerfers sind toleranzbehaftet. Etwaige Toleranzen werden durch einen Sicherheitsbereich bei dieser Art der Scheinwerfersysteme berücksichtigt. Die Verringerung dieser Bereiche ist mit einer Optimierung der Lichtfunktion gleichzusetzen, Abbildung 2.13.

²¹Die Probanden befanden sich 50 m entfernt von der Blendlichtquelle (B50L).

²²Der Lichtalgorithmus ist im Lichtsteuergerät integriert und steuert die Lichtfunktionen.

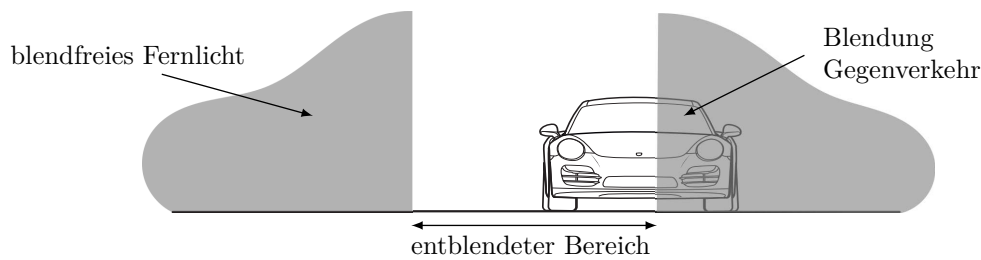


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung der Blendung durch einen horizontal dejustierten Scheinwerfer bei blendfreien Fernlichtsystemen

Nach *Hummel* wird die Einstelltoleranz als Beitrag des Sicherheitsbereichs gesehen, der nach seinen Angaben den von ihm bestimmten Nutzungsgrad des Scheinwerfersystems von 94,68 % um 6,70 % reduziert. Angenommen wird hierfür ein Winkelbereich von 1° [55]. Durch die Reduzierung des Nutzungsgrads auf 87,98 % bei einem MXB-System ist der Vorteil gegenüber einem MDF-System ohne Sicherheitsbereich nicht mehr gegeben, Abschnitt 2.3.4. *Flannagan* sieht den Vorteil innovativer Lichtfunktionen, infolge einer fehlerhaften Scheinwerfereinstellung ebenfalls limitiert [38]. *Roslak et al.* [101] untermauern den Beitrag der toleranzbehafteten Grundeinstellung neben der Systemlatenz zur Erhöhung des Sicherheitsbereichs. Für *Totzauer* führen der zunehmend modulare Aufbau des Scheinwerfers, Abschnitt 2.1.2, und die Position des Scheinwerfers in der Nähe des Motors zu einer Vergrößerung des Sicherheitsvorhalts [121]. Betroffen sind hierbei die Grundausrichtung des gesamten Scheinwerfers durch die Vibrationen und die Abstrahlcharakteristika der einzelnen Matrix-Segmente durch den modularen Aufbau. Zusammenfassend kann durch eine kontinuierliche Überprüfung der Scheinwerferausrichtung die Qualität der verschiedenen Lichtfunktionen gewährleistet werden.

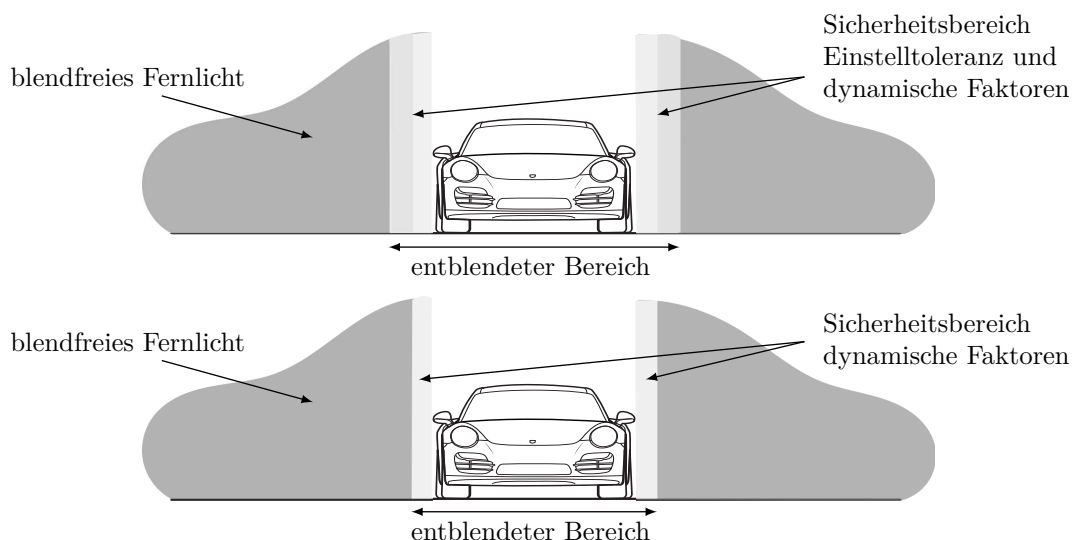


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung der Verringerung der Sicherheitsbereiche zur Optimierung blendfreier Fernlichtsysteme

3 Automatisierte Scheinwerfereinstellung

In diesem Kapitel werden aus der Literatur bekannte Verfahren zur Bestimmung der Fehlstellungen und zur automatisierten Justage der Hauptscheinwerfer genannt und bewertet, Abschnitt 3.1. Im Kontext einer seriennahen Entwicklung wird ein innovativer Ansatz für eine automatisierte Scheinwerfereinstellung abgeleitet, Abschnitt 3.2. Grundlage für jedes Verfahren zur automatisierten Scheinwerferausrichtung ist ein Zusammenwirken zwischen fahrzeuginterner Kamera und Hauptscheinwerfer.

3.1 Bekannte Konzepte

Unter dem Begriff Onlinekalibrierung wird mit Fokus auf kamerabasierte Lichtsysteme die Einstellung der Hauptscheinwerfer mittels der Fahrerassistentenkamera verstanden. Methoden zur Lagebestimmung der Hauptscheinwerfer mithilfe der fahrzeuginternen Kamera sind bekannt und in einer Vielzahl von Patenten und Veröffentlichungen in unterschiedlichen Ausführungen beschrieben. In Abschnitt 3.1.1 werden die verschiedenen Ansätze diskutiert. Der Begriff Onlinekalibrierung im Speziellen wird von *Totzauer* geprägt und liefert mit dem Fokus auf eine Umsetzung mittels Kalibriermarken die aktuellsten Untersuchungsergebnisse [121], [120]. *Petri* [93] setzt auf einen Lösungsansatz, der vergleichbar zu *Totzauer* auf zusätzlichen Schattenmarkierungen gründet, jedoch über einen Soll-Ist-Vergleich eine Nachregelung der Hauptscheinwerfer beschreibt. *Thom et al.* [117] nehmen sich ebenfalls dem Thema an, richten ihren Untersuchungsschwerpunkt allerdings auf die Detektion der Scheinwerferlichtverteilung auf der Fahrbahn. *Kubitza et al.* [71] geben einen Überblick über die Entwicklung der kamerabasierten Scheinwerfereinstellung und stellen ein Zukunftskonzept für die Kalibrierung hochauflösender Scheinwerfersysteme mittels aktiver Streifenprojektion vor. *Schäfer et al.* [103] bestimmen die Fehlstellung des Scheinwerfers, indem die Kamera die Orientierung der Objekte im Raum bestimmt, auf der die Lichtverteilung abgebildet wird. In Abschnitt 3.1.2 werden die verfügbaren Erkenntnisse prototypischer Umsetzungen der Kalibrierverfahren dargestellt. Nach *Totzauer* [121] umfassen die grundlegenden Systemanforderungen einer Onlinekalibrierung eine hohe Wiederholrate, Abschnitt 3.1.3, bei Dunkelheit und eine nicht wahrnehmbare Ausführung des Kalibriervorgangs für den Fahrer sowie für andere Verkehrsteilnehmer. Im Kontext einer seriennahen Umsetzung sind die Entwicklungskosten und die Systemintegration in das Fahrzeug als Hauptanforderungen zu betrachten, Abschnitt 3.1.4.

3.1.1 Überblick über die Kalibrieransätze

Eine Analyse der aktuellen Patentsituation und der Literatur zur Umsetzung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung zeigt eine uneingeschränkte Nutzung des Kamerasystems in Verbindung mit einer Erkennung charakteristischer Punkte der Scheinwerferlichtverteilung. Die Konzepte spalten sich in zwei Varianten auf, die einerseits auf zusätzliche kontrastbedingte Markierungen setzen [122], [52], [17], ähnlich den Ansätzen von *Totzauer* und von *Petri*, und andererseits die Charakteristika der vorhandenen Lichtverteilung zur Kalibrierung nutzen [104], [33], [115], [133], [70], [116], [53], ähnlich den Ansätzen von *Thom et al.* und *Schäfer et al.*

Kalibrieransätze mittels Licht- und Schattenmarkierungen: Bei der Kalibriermethode mittels Zusatzoptiken werden die Licht- bzw. Schattenmarkierungen im Vorfeld der Lichtverteilung vor dem Fahrzeug unsichtbar für den Fahrer auf die Straße projiziert, Abbildung 3.1. Über die Kamera wird die Lage der Markierungen erfasst und unter der Annahme einer bekannten Geometriebeziehung zwischen Fahrbahn und Fahrzeug wird deren Orientierung relativ zur Anbauposition des Scheinwerfers bestimmt. Unter Vernachlässigung der mechanischen Toleranz zwischen der Ausrichtung der Referenzpunkte und der Hauptscheinwerfer kann auf eine Fehlstellung dieser geschlossen werden. Vorteilhaft sind bei diesem Verfahren die dauerhafte Durchführbarkeit und die Unsichtbarkeit für den Fahrer. Nachteilig sind die Zusatzkosten, die durch ein weiteres Lichtmodul entstehen, der Einfluss der nicht exakt bekannten Geometriebeziehung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn und der erhöhte Ressourcenbedarf, der durch die dauerhafte Ausführung der Kalibrierung die eigentliche Aufgabe der Objekterkennung für kamerabasierte Lichtassistenzfunktionen beeinflusst.

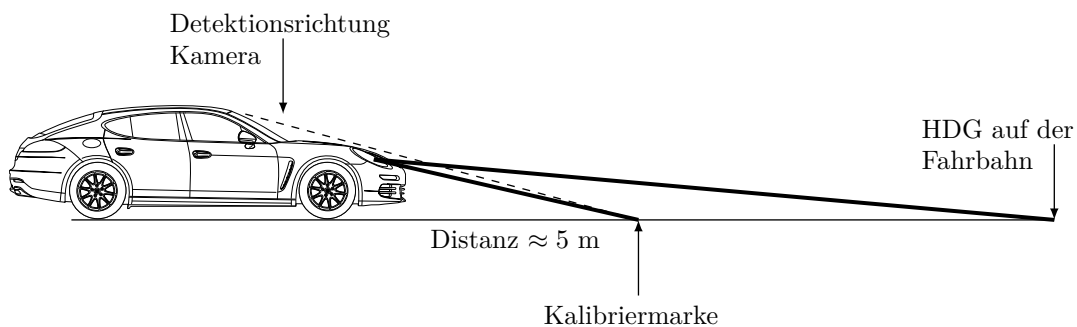


Abbildung 3.1: Automatisierte Scheinwerfereinstellung über eine Kalibriermarke

Die Patentschriften, die diesen Ansatz präferieren, fokussieren unterschiedliche Kernpunkte des Gesamtsystems. In [17], [122] wird die Merkmalsextraktion stärker betrachtet, wobei in [122] eine Modulation einer L-förmigen Lichtmarkierung vorgeschlagen wird. Demgegenüber steht in [17] eine Variation der Beleuchtungsstärke der Grundlichtverteilung im Vorfeld des Fahrzeugs. Der Gesamtsystemablauf sieht die Aktivierung des Kalibrierprozesses oberhalb einer Geschwindigkeitsschwelle und den Einsatz eines speziellen Musters zur Schätzung von Nickwinkel, Wankwinkel

und der Fahrbahnlage vor [52]. Allgemein wird eine Nachregelung der Kalibriermarke über einen Soll-Ist-Vergleich vorgeschlagen, der unter den gemachten Annahmen einer korrigierten Ausrichtung der Hauptscheinwerfer entspricht.

Kalibrieransätze mittels Charakteristika der Lichtverteilung: Der alternative Ansatz zur Scheinwerferkalibrierung nutzt die Charakteristika der herkömmlichen Lichtverteilungen. Dabei wird zwischen fahrinaktiven [104], [33], [115] und fahraktiven Ausführungen [133], [70], [116], [53] unterschieden.

Die Konzepte für eine statische Kalibrierung, Abbildung 3.2, setzen eine vordefinierte Positionierung des Fahrzeugs vor einer Messfläche voraus, wobei für [104], [33] keine Abstandsinformation notwendig ist. Die fehlende Entfernungsinformation wird durch eine definierte Verlagerung und eine nachfolgende Detektion der Lichtverteilung in den verschiedenen Orientierungen bestimmt, final ist die vollständige Geometriebeziehung zwischen Fahrzeug und Scheinwerfer bekannt und die Fehlstellung der Hauptscheinwerfer bestimmbar. Bei [115] wird die Lageinformation eines Referenzsegments der Lichtverteilung als Kalibrierinformation gespeichert, von einer aktiven Nachregelung wird abgesehen. Neben der Detektion der abgebildeten Lichtverteilung auf einer Messfläche ist auch eine Erkennung des Lichtbilds auf dem Fahrzeugheck vorausfahrender Verkehrsteilnehmer denkbar, wodurch über eine Kenntnis der Geometriebeziehungen eine Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung möglich ist [149]. *Schäfer et. al* nehmen sich dem Thema an und präsentieren erste prototypische Umsetzungen [103].

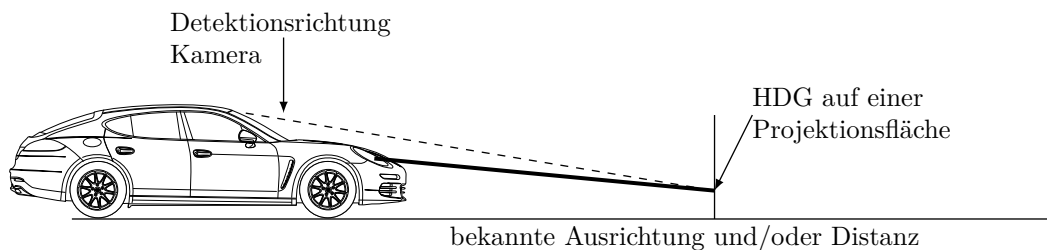


Abbildung 3.2: Automatisierte Scheinwerfereinstellung mit bekannter Ausrichtung und/oder Distanz zwischen Scheinwerfer und Projektionsfläche

Bei den dynamischen Verfahren werden Referenzpunkte der Lichtverteilung auf der Fahrbahn erkannt, Abbildung 3.3. Die Fehlstellung der Scheinwerfer kann unter der Voraussetzung einer bekannten Lagebeziehung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn bestimmt werden. Da im Vergleich zu den Konzepten mit den Referenzmarkierungen und den statischen Ansätzen mittels eigentlicher Lichtverteilung im fahraktiven Konzept eine größere Entfernung zur Ausprägung der zu erkennenden Charakteristik vorliegt, wird in [70], [116] der Fokus auf die Merkmalsextraktion gerichtet. Dabei werden Verfahren beschrieben, die auf Differenzbildern basieren. Bei [133], [53] wird die Kalibrierung auf blendfreie Fernlichtverteilungen zugeschnitten. Besonders erwähnenswert ist die Forderung nach einer Einstellung von Kamera und Scheinwerfer aufeinander [53], was als optische Kopplung bezeichnet werden kann, Abschnitt 3.2.2.

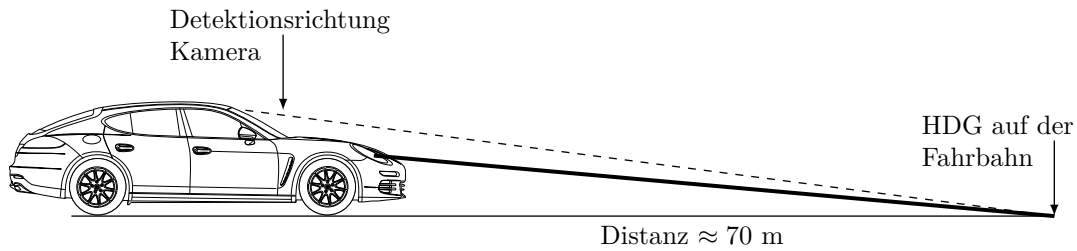


Abbildung 3.3: Automatisierte Scheinwerfereinstellung über eine HDG-Erkennung auf der Fahrbahn

Die geringen Kosten durch die Verwendung bestehender Lichtverteilungen und die unkritische Erweiterung der Bildverarbeitung zur Merkmalsextraktion bei den statischen Ansätzen sind positiv zu bewerten. Hingegen muss der Ressourcenbedarf der Bildverarbeitung bei fahraktiven Systemen kritisch hinterfragt werden, da die Merkmalsextraktion parallel zur Objektdetektion lauffähig sein muss. Negativ sind bei der fahrinaktiven Kalibrierung die geringe Wiederholrate des Verfahrens, die Wahrnehmbarkeit des Kalibrierprozesses für den Fahrer und die Ausrichtung des Fahrzeugs vor einer Messwand. Bei der fahraktiven Systemausführung sind die hohe Wiederholrate und die für den Fahrer nicht sichtbare Ausführung hervorzuheben.

3.1.2 Untersuchungsergebnisse prototypischer Umsetzungen

Erste prototypische Umsetzungen der Onlinekalibrierung sind aus den Veröffentlichungen von *Totzauer* [121] und von *Petri* [93] bekannt und ermöglichen Gesamtsystembewertungen. Die Kalibrierverfahren verwenden den in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Ansatz mittels Licht- bzw. Schattenmarkierungen. Die Publikationen von *Thom et al.* [117] und *Schäfer et al.* [103] zeigen ebenfalls einen prototypischen Aufbau. Für die Kalibrieransätze mittels der Charakteristika der Lichtverteilung sind jedoch keine detaillierten Systembewertungen verfügbar.

Kalibrieransätze mittels Licht- und Schattenmarkierungen: Den Untersuchungen von *Totzauer* sind Bewertungen bezüglich der Systembestandteile und der Umfeldbedingungen für den Kalibrierablauf zu entnehmen. Der wichtigste Bestandteil dieser Art der Onlinekalibrierung ist der Neigungswinkel der Module, die die Kalibriermarkierungen erzeugen. Die angegebenen Winkel werden mit 9° bis 10° relativ zur Fahrzeuglängsachse in Richtung Fahrbahnboden angegeben und entstammen einer Probandenstudie, bei der die Wahrnehmung der Markierung auf der Fahrbahnoberfläche Gegenstand der Untersuchung ist [121]. Weiter kann unter Berücksichtigung der Fahrzeugdynamik ein linearer Zusammenhang zwischen dem Nickwinkel und dem Wankwinkel des Fahrzeugs im Verhältnis zum Detektionswinkel der Markierung auf der Fahrbahn durch die Kamera abgeleitet werden. Der valide Winkelbereich beträgt $\pm 2^\circ$. Die größte Änderung der Kalibriermarke geht aus den Nickwinkeln hervor. Für einen Nickwinkel von 1° wird eine horizontale Ab-

weichung der Marke um $0,71^\circ$ und eine vertikale Abweichung der Marke um $0,32^\circ$ ermittelt ¹. Nach *Totzauer* sind die auftretenden Dynamikeinflüsse kompensierbar [121]. Im Hinblick auf die Straßenkategorien, die sich für eine Kalibrierung eignen, werden Autobahnen und Bundesstraßen empfohlen. Ebenso wird eine gute Qualität des Fahrbahnbelags vorausgesetzt. In besonderem Maße trägt das Fahrverhalten des Fahrers zum Kalibrierergebnis bei. Ein vorausschauendes Fahren wird einer aggressiven Fahrweise vorgezogen [121].

Im Zuge der Auswertung kann herausgearbeitet werden, dass die horizontale Detektionstoleranz mit $\pm 0,2^\circ$ unter nahezu perfekten Bedingungen [121] vergleichbar mit den statistischen Befunden zur Scheinwerfereinstellung, Abschnitt 2.4.2, ist. Unter der Annahme einer Normalverteilung ist eine Standardabweichung von $\sigma_{99\%} = 0,067^\circ$ bzw. $\sigma_{95\%} = 0,1^\circ$ ableitbar. Unter erschwerten Bedingungen variieren die bestimmten Streubreiten zwischen $3,35^\circ$ und $0,15^\circ$, abhängig von der genutzten Gruppierungslänge. *Totzauer* gruppiert die detektierten Winkel und führt Quantisierungsstufen ein. Sind die Unterschiede zwischen den Detektionswinkeln innerhalb einer Gruppierung zu groß, wird die Gruppierung verworfen. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse werden Gruppierungslängen zwischen 4 s bis 8 s empfohlen. Die resultierenden Toleranzen liegen dabei bei $\sigma_{99\%,4s} = 0,05^\circ$ bzw. $\sigma_{95\%,4s} = 0,075^\circ$ und $\sigma_{99\%,8s} = 0,0417^\circ$ bzw. $\sigma_{95\%,8s} = 0,0625^\circ$ [121]. Für die vollständige Kalibriertoleranz muss allerdings noch die Unsicherheit zwischen der geometrischen Orientierung der Kalibriermarke und der Ausrichtung des eigentlichen Scheinwerfermoduls in Betracht gezogen werden, was die Systemtoleranz zwangsläufig erhöht, Abschnitt 3.1.4.

Die Untersuchungen von *Petri* zeigen weitere Einflussgrößen, die bei dieser Art der Kalibrierung zu beachten sind. Der Reifendruckunterschied ist hierbei ein wichtiger Faktor. Ein Druckunterschied von 1 bar zwischen den Hinter- und den Vorderreifen führt bei der prototypischen Umsetzung zu einer Abweichung des Detektionswinkels von $+0,07^\circ$ bzw. $-0,07^\circ$ [93]. Ohne eine dauerhafte Reifendruckkontrolle² muss von einem systematischen Fehler ausgegangen werden. Der Einfluss eines aktiven Luftfahrwerks wird zwar angesprochen, kann aber nicht messtechnisch erfasst werden. Die träge Regelung des Luftfahrwerks wird bei Beladungszuständen aktiv und muss im Vergleich zur Lage des Fahrzeugs beachtet werden. Der Einfluss des Kamerasystems führt zu einer Abweichung des Detektionswinkels von $\pm 0,06^\circ$ in vertikaler und horizontaler Richtung [93], was auf den Detektionsbereich der Kamerapixel zurückzuführen ist. Die Toleranzen der Scheinwerferbewegungen durch die Stellmotoren können mit $\pm 0,76^\circ$ für die horizontalen Verfahrwinkel und mit $\pm 0,28^\circ$ für die vertikalen Verfahrwinkel angenommen werden [93]. Zusätzlich wird von *Petri* die Einstelltoleranz der Hauptscheinwerfer angeführt, da eine Ausrichtung der Kalibriermarke relativ zur eigentlichen HDG des Scheinwerfers ebenfalls toleranzbehaftet ist und initial durchgeführt werden muss. Die Unsicherheit der visuell-manuellen Scheinwerfereinstellung wird mit $\pm 0,115^\circ$ für die vertikale und mit $\pm 0,23^\circ$ für die horizontale Einstellung angenommen [93].

¹Für einen Wankwinkel von 1° wird eine horizontale Abweichung der Marke um $0,09^\circ$ und eine vertikale Abweichung der Marke um $0,16^\circ$ ermittelt.

²Das Reifendruck-Kontroll-System ist für Fahrzeug mit einer Erstzulassung nach dem 01.11.2014 gesetzlich vorgeschrieben [2].

Eine theoretische Abschätzung der Systemtoleranzen unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren geht von einer Gesamttoleranz für die horizontale Einstellung von $\pm 0,31^\circ$ und für die vertikale Einstellung von $\pm 0,38^\circ$ aus [93]. Die entsprechenden Standardabweichungen lassen sich zu $\sigma_{95\%,\text{vertikal}} = 0,1919^\circ$ und $\sigma_{99\%,\text{vertikal}} = 0,1280^\circ$ sowie $\sigma_{95\%,\text{horizontal}} = 0,1547^\circ$ und $\sigma_{99\%,\text{horizontal}} = 0,1031^\circ$ bestimmen. Abschließende experimentelle Untersuchungen zur Gesamtsystemtoleranz zeigen eine Einstellgenauigkeit von $\pm 0,115^\circ$ [93]. Die abgeleiteten Standardabweichungen unter der Annahme einer Normalverteilung ergeben sich zu $\sigma_{95\%} = 0,0573^\circ$ bzw. $\sigma_{99\%} = 0,0382^\circ$. Die Toleranzen sind geringer im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen von *Totzauer* und den Werten aus Abschnitt 2.4.2. Im Hinblick auf die Umgebungsbedingungen werden keine näheren Informationen gegeben. Ebenso werden die Einflüsse des systematischen Fehlers durch die Variation des Reifenluftdrucks nicht näher betrachtet. Gleiches gilt für die Ausrichtung der Kalibriermarke relativ zur HDG.

Kalibrieransätze mittels Charakteristika der Lichtverteilung: *Thom et al.* nutzen einen der in Abschnitt 3.1.1 eingeführten Ansätze zur Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung mit vorhandenen Lichtverteilungen und gehen in ihrer Veröffentlichung auf die Bildverarbeitung ein. Es wird ein überwachtes Verfahren zur Detektion der HDG eines Matrixscheinwerfersystems, Abschnitt 2.3.4, präsentiert, wobei für die Bestimmung der HDG ein künstliches neuronales Netz genutzt wird [117]. Etwaige Trainingsdaten sind für diese Art der Merkmalsextraktion während des Vorentwicklungs- und Serienentwicklungsprozesses notwendig. Im Hinblick auf die Vielzahl an Einflussfaktoren hinsichtlich einer Erkennung der HDG auf der Fahrbahn bei Dunkelheit werden keine weiteren Angaben gemacht. Die Ergebnisse zeigen bei 90 % der Messungen eine Abweichung von ± 3 Pixeln, die vertikale Einstellgenauigkeit liegt bei weniger als $\pm 0,1^\circ$ [117]. Die abgeleiteten Standardabweichungen können zu $\sigma_{95\%,\text{vertikal}} = 0,05^\circ$ bzw. $\sigma_{99\%,\text{vertikal}} = 0,033^\circ$ bestimmt werden.

Die aktuellste prototypische Umsetzung ist der Veröffentlichung von *Schäfer et al.* zu entnehmen. Im Zuge des durch das Bundesministerium für Forschung und Entwicklung geförderten Projekts „it’s OWL-ASSIST“ im Spitzencluster „it’s OWL“ ist ein Prototyp verfügbar, der eine automatisierte Scheinwerfereinstellung auf Basis einer herkömmlichen Lichtverteilung und eines Monokamerasystems ermöglicht. Das Prinzip ist hierbei wie folgt zu verstehen. In einer statischen Situation wird das projizierte Lichtbild des Scheinwerfers beispielsweise an einem Fahrzeugheck eines anderen Verkehrsteilnehmers durch die Kamera erfasst. Zusätzlich ist die Entfernungsinformation zum projizierten Lichtbild aus dem Kamerabild bestimmbar. Final ist eine Aussage über die Fehlstellung des Scheinwerfers möglich. Erste Untersuchungen zeigen eine Unsicherheit der Entfernungsschätzung von 0,61 %. Für die Kalibrierung wird für das Szenario Wand eine Dauer von 25 s für die Kalibrierung der Scheinwerfer angegeben [103]. Weitere experimentelle Bewertungen zur Gesamttoleranz des Systems im Feld stehen noch aus.

3.1.3 Wiederholrate des Kalibriervorgangs

Zur Dimensionierung der Wiederholrate eines Kalibriervorgangs wird die maximale Anzahl an Kalibriervorgängen innerhalb eines Jahres abgeschätzt und bewertet. Dabei wird die Annahme getroffen, dass ein durchschnittlicher Autofahrer eine jährliche Kilometerleistung von 18.000 km zurücklegt [23]. Nach einer Studie erfolgen 15 % dieser Fahrten bei Dunkelheit [107]. Das zurückgelegte Streckenprofil³ wird am Tag und in der Nacht mit 31 % Autobahn, 18 % Bundesstraße, 18 % Landstraße und 33 % Stadtverkehr angenommen [12]. Nach Abschnitt 3.1.2 wird eine Onlinekalibrierung mittels Kalibriermarken auf Autobahnen und Bundesstraßen befürwortet und ist damit in 7 % der gefahrenen Kilometer pro Jahr einsetzbar. Die Angaben sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

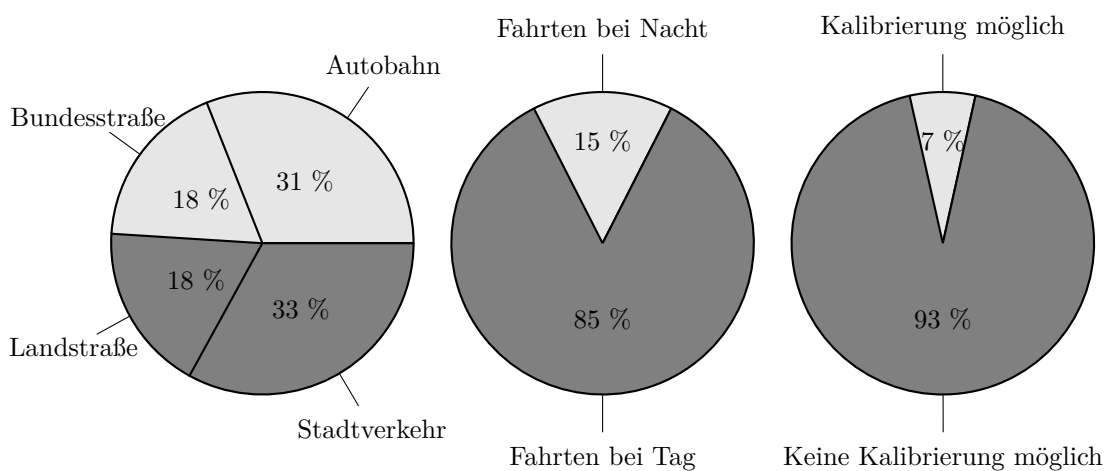


Abbildung 3.4: Prozentuale Darstellung der Kilometerleistung pro Jahr für das jeweilige Streckenprofil, die Fahrleistung bei Nacht und am Tag sowie für den abgeschätzten Einsatz der Kalibrierung

Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h und einer Dauer des Kalibrierprozesses⁴ von ungefähr 30 min, abgeleitet von *Totzauers* Ausführungen über die Gruppierungslängen bei der Detektion, Abschnitt 3.1.2, erstreckt sich die einmalige Durchführung der Onlinekalibrierung über eine Strecke von 50 km. Unter Berücksichtigung der Kilometerleistungen bei Nacht auf Bundesstraßen und Autobahnen kann die Überprüfung der Hauptscheinwerferausrichtung innerhalb eines Jahres 25-mal durchgeführt werden. Durchschnittlich wird somit die Kalibrierung alle zwei Wochen wiederholt, was einer Kilometerleistung von knapp 700 km entspricht. Berücksichtigt werden muss, dass der Anteil der Nachtfahrten in den Wintermonaten über dem Anteil der Nachtfahrten in den Sommermonaten liegt. Es ist anzunehmen, dass die Kalibrierung in den Wintermonaten im Vergleich zu den Sommermonaten häufiger durchgeführt wird. Da die Anzahl der Fahrten bei Dunkelheit in den

³*Sprute* ermittelt ein Streckenprofil gemäß [112] mit 47,8 % Bundes- und Landstraßen, 21,8 % Autobahnen und 29,5 % Stadtstraßen.

⁴Es wird angenommen, dass die Kamera 22 Bilder pro Sekunde aufnimmt und ungefähr 40.000 Messwerte erfasst werden müssen.

Wintermonaten allerdings ebenfalls erhöht ist, ist eine größere Wiederholrate des Kalibriervorgangs zweckdienlich.

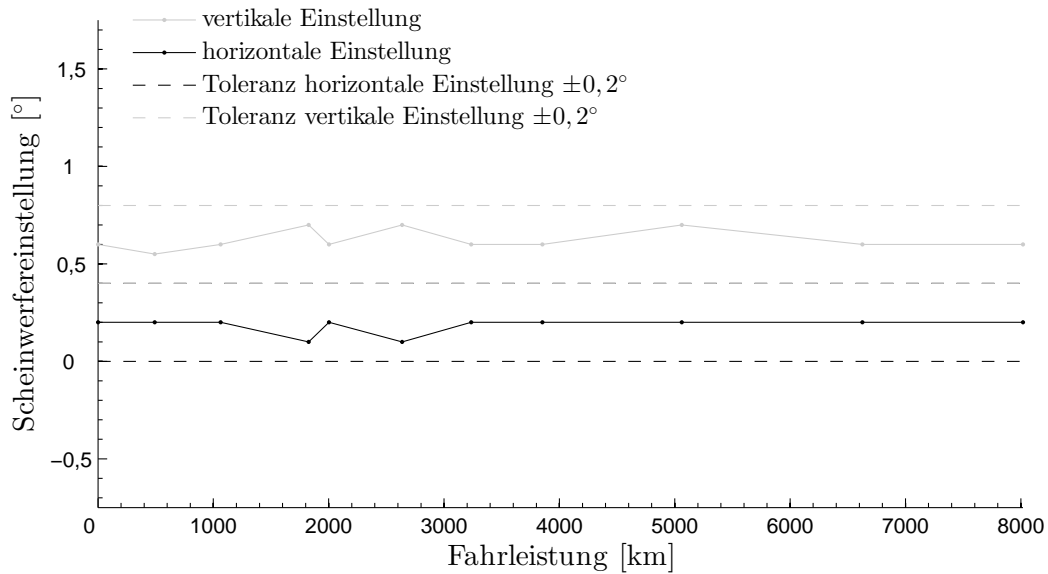


Abbildung 3.5: Referenzmessung der Scheinwerfereinstellung für den linken Scheinwerfer

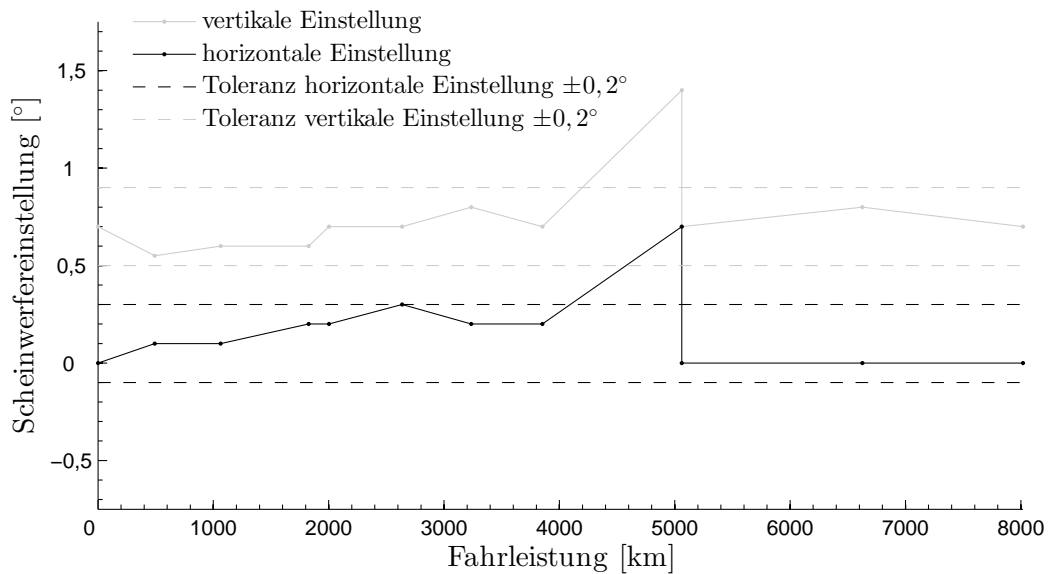


Abbildung 3.6: Referenzmessung der Scheinwerfereinstellung für den rechten Scheinwerfer

Die Notwendigkeit einer Kalibrierung der Scheinwerfer im Abstand von 700 km ist fraglich, zumal gegenwärtige Kontrollen lediglich während des Service in der Werkstatt oder im Zuge des kostenlos angebotenen *Lichttests* im Herbst eines jeden Jahres vorgesehen sind. Mit Blick auf den jährlich durchgeführten *Lichttest* schneiden Neuwagen deutlich besser ab. Die Mängelliste im Bereich der Beleuchtung ist bei älteren

Fahrzeugen größer [89]. Grundlegend kann, sofern keine unvorhersehbaren Einwirkungen wie beispielsweise Unfälle oder eine fehlerhafte Einstellung der Scheinwerfer im Servicebereich vorliegen, von einem Prozess ausgegangen werden, bei dem das Auftreten einer Fehlstellung der Scheinwerfer eine Laufleistung von 700 km übersteigt.

Durchgeführte Untersuchungen zur Veränderung der Scheinwerfereinstellung über eine Fahrleistung von 8.000 km zeigen für den linken Scheinwerfer keine markanten Abweichungen, Abbildung 3.5. Für den rechten Scheinwerfer wird die angenommene Einstelltoleranz von $\pm 0,2^\circ$, vergleiche Abschnitt 2.4.2, für die vertikale und die horizontale Einstellung nach 5.000 km überschritten, Abbildung 3.6. Die Referenzmessungen werden mit dem in Abschnitt 6.1.3 dargestellten Messverfahren durchgeführt. Eine Unterbrechung des Kalibrierverfahrens und damit ein längerer Kalibrierprozess im Verkehrsraum ist mit Fokus auf ein besseres Endergebnis in jedem Fall zu unterstützen, siehe hierzu auch [121].

Unter diesen Umständen kann die Forderung nach einer immer aktiven Kalibrierung abgeschwächt werden. Die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Überprüfung der Scheinwerferausrichtung bleibt jedoch bestehen. Das Augenmerk kann zunehmend auf eine kostengünstige Integration in bestehende Seriensysteme und in die Unterstützung der Werkstätten im Servicefall gerichtet werden.

3.1.4 Integrationsmöglichkeit in bestehende Seriensysteme

Die Onlinekalibrierung ist an die Verfügbarkeit einer Fahrerassistenzkamera gebunden, Abschnitt 3.1.1. Aus Abschnitt 2.3 sind Seriensysteme bekannt, die kamerabasierte Lichtfunktionen ermöglichen und dadurch die Basis für eine Integration der automatisierten Scheinwerfereinstellung in das Fahrzeug liefern. Für eine Eingliederung in aktuelle Seriensysteme sind die Kosten für die Entwicklung und die Art der Systemintegration von Bedeutung.

Die Entwicklungskosten eines Scheinwerfers werden durch das Design, den zur Verfügung stehenden Bauraum und die optische Auslegung bestimmt. Bei den Kalibrieransätzen aus Abschnitt 3.1.1, die auf eine zusätzliche Optik zur Generierung der Licht- oder Schattenmarkierungen setzen, entsteht Konfliktpotenzial. Ein zusätzliches Lichtmodul umfasst ein optisches System mit einem oder mehreren Leuchtmitteln und ein Steuergerät, was Auswirkungen auf das Design und den Bauraum des Scheinwerfers hat. Darüber hinaus steigen die Materialkosten, wodurch die Onlinekalibrierung für den Kunden teurer wird. Für die Validierung des Scheinwerfers als sicherheitsrelevante Fahrzeugkomponente besteht eine Zertifizierungspflicht [30], die durch Modifikationen wie eine Referenzmarkierung erschwert wird. Zusätzliche Prüfungen sind möglich, die wiederum weitere Entwicklungsschleifen verursachen können. Gleiches gilt für die Gewährleistung des Scheinwerferherstellers, die Produktionsschwankungen bei der Ausrichtung der Referenzmarkierungen zur eigentlichen optischen Achse des Scheinwerfers möglichst gering zu halten. Die Frage nach einer zusätzlichen Einstellung bzw. Überprüfung in der Produktionslinie des Automobilherstellers birgt weitere Kosten durch ein mögliches zusätzliches Prüffeld oder

insgesamt längere Produktionszeiten. Vergleichbare Schwankungen können bereits jetzt bei Scheinwerfern beobachtet werden, bei denen ein Modul für die Reichweite und ein Modul für das Vorfeld genutzt wird. Hier werden mittels Stichproben die Produktionsschwankungen des Zulieferers geprüft.

Für die Integration der Onlinekalibrierung in das Fahrzeug ist eine Anbindung an den Lichtalgorithmus des Lichtsystems zu gewährleisten und eine zusätzliche Bildverarbeitung im Steuergerät der Fahrerassistentenkamera zu implementieren. In allen angedachten Konzepten ist die Erkennung der Referenzmarkierungen oder etwaiger Charakteristika der Scheinwerferlichtverteilung durch die Kamera notwendig. Daher muss mit einer Erweiterung der Bildverarbeitungssoftware, gegebenenfalls im Hinblick auf Speicher- oder Laufzeitengpässe mit einer Erweiterung der Steuergeräte-Hardware gerechnet werden. Der Trend zeigt, dass mit der Anzahl der zusätzlichen Funktionen nicht zwangsläufig die Anzahl der Steuergeräte steigt. Dies ginge bereits aus Platzgründen nicht. Der Einsatz hochintegrierter Systeme ist die Folge [11]. In [58] werden Hardwarelösungen für Multi-Threading-Ansätze genannt, die weiteren Spielraum für echtzeitfähige Softwarelösungen bieten. Eine Erweiterung der bestehenden Bildverarbeitung zur Objekterkennung in einem Steuergerät ist somit denkbar. Im Entwicklungsprozess muss darauf geachtet werden, dass eine kamerabasierte Onlinekalibrierung individuell an die Lichtverteilung der Scheinwerfer anzupassen ist. Eine flexible Bildverarbeitung ist zu favorisieren, da während der Implementierung mit einer stetigen Veränderung der Lichtverteilung zu rechnen sein muss. Die Verwendung neuronaler Netze zur Erkennung der charakteristischen Merkmale, Abschnitt 3.1.2, bedingt Trainingsdaten, die im Fall einer lichttechnischen Veränderung der Lichtverteilung neu generiert werden müssen. Etwaige Entwicklungsschleifen sind notwendig, um das Lichtbild unter den Gesichtspunkten der Homogenität und der Zulassung, Abschnitt 2.1.1, für den Serieneinsatz vorzubereiten.

Das Zusammenspiel der Onlinekalibrierung mit dem Lichtalgorithmus ist notwendig, um die bestimmten Fehlstellungen für das Lichtsystem zu nutzen. Die beschriebenen Ansätze in Abschnitt 3.1.1 legen den Schluss nahe, dass die Kalibrierung zum Umfang der Lichtfunktionen gezählt wird und im Lichtalgorithmus umzusetzen ist. Daraus ist ein unflexibler Einsatz der Onlinekalibrierung im Hinblick auf andere Scheinwerfersysteme mit einem abweichenden Algorithmus vorprogrammiert. Grundsätzlich ist eine kostengünstige Variantenbildung in der Produktionslinie vorteilhaft [13], wobei eine Onlinekalibrierung unabhängig vom gewählten Lichtsystem flexibel nutzbar sein sollte.

Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Entwicklungskosten für die Scheinwerfer und der unflexiblen Systemintegration besteht für die bekannten Kalibrieransätze keine Integrationsmöglichkeit in aktuelle Seriensysteme.

3.2 Innovativer Ansatz für eine automatisierte Scheinwerfereinstellung

Für die seriennahe Entwicklung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung sind die Kosten, die Flexibilität und die Toleranzen des Gesamtsystems von größter Bedeutung. Die Anforderungen an hohe Wiederholraten können durch die Erkenntnisse in Abschnitt 3.1.3 abgeschwächt werden. Dennoch sollte der Kalibrierungsprozess während des Fahrbetriebs und bei Dunkelheit durchführbar sein.

Die Kosten können maßgeblich durch die Nutzung vorhandener Charakteristika in der Lichtverteilung, Abschnitt 3.2.1, verringert werden, da keine zusätzlichen Lichtmodule in den Scheinwerfer integriert werden müssen, Abschnitt 3.1.4. Im Hinblick auf die Flexibilität und die Toleranzen des Gesamtsystems sollte die Anzahl der zusätzlichen Sensordaten neben den Informationen der Fahrerassistentenkamera gering gehalten werden, da diese ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet sind, Abschnitt 3.1.2. Eine Ausrichtung der Hauptscheinwerfer auf die Orientierung des Kamerasystems ist wünschenswert, Abschnitt 3.2.2, da die Lage der anderen Verkehrsteilnehmer von eben diesem bestimmt wird. Eine hinreichende Übereinstimmung der Ausrichtung des Kamerakoordinatensystems mit der Ausrichtung des Fahrzeugkoordinatensystems ist vorauszusetzen. Abgeleitet werden kann ein finaler Systemaufbau bestehend aus einer Kamera, den Scheinwerfern mit charakteristischem Lichtbild und dem Algorithmus, worin der Kalibrierprozess implementiert wird, Abschnitt 3.2.3.

3.2.1 Standardisierte Bestimmung der Hell-Dunkel-Grenze

Die HDG der Lichtverteilung eines Scheinwerfers wird als Übergang zwischen dem beleuchteten und dem unbeleuchteten Bereich bezeichnet, der entsteht, wenn die Scheinwerferlichtverteilung auf eine Projektionsfläche trifft, Abschnitt 2.1.1. Aufgrund ihres charakteristischen H0V0-Punkts wird die HDG gegenwärtig für die Einstellung des Hauptscheinwerfers genutzt, Abschnitt 2.4. Für ein Kalibrierverfahren bietet sie den optimalen Ansatzpunkt, da für alle Abblendlichtverteilungen eine vordefinierte Ausprägung sowie eine Mindestschärfe der HDG vorgeschrieben ist [129].

Methoden zur Bestimmung der HDG sind bereits durch *Pollack* [95] und *Schmidt-Clausen* [105] bekannt. *Schmidt-Clausen* zeigt verschiedene mathematische Ansätze zur Berechnung der HDG auf der Grundlage lichttechnischer Messgrößen, *Pollack* vergleicht die vertikale Einstellgenauigkeit der bekannten Berechnungsverfahren mit der visuell-manuellen Methode zur Scheinwerfereinstellung. Die Erkenntnisse von *Schmidt-Clausen* lassen den Schluss zu, dass die HDG als Wendepunkt des vertikalen, logarithmischen Beleuchtungsstärkeverlaufs angesehen werden kann. Die Untersuchungen von *Pollack* bestätigten dies und geben erreichbare Standardabweichungen an, Abschnitt 2.4.2. Aktuelle Arbeiten nehmen sich dem Thema ebenfalls an. *Kiel* untersucht die Form der HDG zur Bestimmung des H0V0-Punkts unter Verwendung mathematischer Verfahren auf der Basis lichttechnischer Größen [61].

Die genutzten Versuchsaufbauten betrachteten optimale Umfeldbedingungen. Variable Bedingungen werden von *Manz* [84] und *Flannagan et al.* [39] untersucht. *Manz* zeigt, dass eine objektive Bewertung der Lichteinstellung in Entfernungen von 10 m und von 25 m keine identischen Resultate liefert [84]. *Flannagan et al.* beschreiben eine subjektive Verschiebung der HDG bei einer Änderung der Umfeldleuchtdichte [39]. Ein HDG-basiertes Kalibrierverfahren, das entfernungs- und umfeldunabhängig agiert, muss diese Sachverhalte berücksichtigen. Der überwiegende Einsatz von Projektionssystemen sorgt für scharfe Abbildungen. Nachteilig sind die auftretenden Aberrationseffekte, die durch die spektrale Empfindlichkeit der Messtechnik einen Einfluss auf die reproduzierbare Erkennung der HDG haben, Abschnitt 6.2.3.

Die Nutzung kamerabasierter Messtechnik zur Bestimmung der HDG ist in der Produktionslinie bereits etabliert, Abschnitt 2.4.1. Ansätze, die in diesem Bereich auf den Einsatz einer Leuchtdichtekamera setzen, sind bekannt, finden sich allerdings ausschließlich in Forschungseinrichtungen wieder [121]. Ein Vergleich zwischen den Auswertungen mit der Fahrerassistentenkamera und den lichttechnischen Methoden steht noch aus. Für eine automatisierte Scheinwerfereinstellung ist eine Bewertung hinsichtlich der Lagebestimmung der HDG über den H0V0-Punkt notwendig. Eine reproduzierbare Erkennung der HDG ist die Grundlage für eine automatisierte Scheinwerfereinstellung.

3.2.2 Aktive Triangulation und optische Kopplung

Zur Bestimmung der Ausrichtung des Scheinwerfers ist die projizierte Lage der HDG im Raum relativ zur Anbauposition des Scheinwerfers von Bedeutung. Die Fahrerassistentenkamera und die Scheinwerfer befinden sich nicht an derselben Position im Fahrzeug. Die Folge ist ein Parallaxe-Effekt, Abschnitt 4.2.2, wodurch die Bildpixel, die die HDG auf dem Kamerabild abbilden, keine Aussage über die tatsächliche Lage im Raum zulassen.

Unter der Annahme einer beliebig großen Entfernung zur Projektionsfläche kann der Parallaxe-Effekt vernachlässigt werden. Eine Erkennung der HDG auf der Straße würde einer Entfernung von knapp 70 m entsprechen⁵. Jedoch ist hierbei fraglich, ob eine Unterscheidung der HDGs für den linken und den rechten Scheinwerfer überhaupt gleichzeitig möglich ist. Im Bereich von 10 m, der aktuell für die Lichteinstellung genutzt wird, muss der Parallaxe-Effekt berücksichtigt werden, was zwar eine reine Detektion der HDG durch die Monokamera ausschließt, aber eine reproduzierbare Erkennung des H0V0-Punkts erleichtert.

Sensordatenfusion: Eine Entfernungsschätzung ist bei Monokamerasystemen durch zusätzliche Modellannahmen wie beispielsweise durch die Kenntnis bekannter Längenverhältnisse des detektierten Objekts möglich. Allerdings müssen größere Schätzfehler berücksichtigt werden [79]. Die Annahme bekannter Längenverhältnisse

⁵Die Distanz kann unter der Annahme eines Neigungswinkels der Lichtverteilung von 1 % und einer Anbauhöhe der Scheinwerfer von 0,7 m abgeleitet werden.

ist bei der HDG nicht gegeben, da diese als eine Ansammlung von Vektoren angesehen werden kann, die definierte Winkelbeziehungen zueinander besitzen. Eine Fusion des Kamerabilds mit Umfeldsensoren bietet einen Lösungsansatz. Über die Umfeldsensorik wird die geometrische Lage einer Projektionsfläche bestimmt. Durch die Erkennung der HDG auf dem Kamerabild und die bekannte Geometriebeziehung im Zuge der Sensorfusion kann auf die Ausrichtung des Hauptscheinwerfers geschlossen werden. Etwaige Sensorsysteme können in Form von Lidar-Systemen, Ultraschallsensoren, Time-of-Light-Kameras oder Radar-Systemen realisiert werden. Gegenwärtige Ausstattungsvarianten⁶ sehen lediglich Ultraschallsensoren in Form einer Einparkhilfe (Ausstattungsvariante 34 %) sowie Radar-Systeme in Form eines Spurwechsellassistenten und eines Abstandsregelautomaten (Ausstattungsvariante jeweils 1 %) vor [66]. Lidar-Systeme und Time-of-Light-Kameras gehören zu den zukünftigen Sensorsystemen im Automobilbereich und stehen für eine seriennahe Umsetzung der automatisierten Scheinwerfereinstellung aktuell nicht zur Verfügung. Ultraschallsensoren haben lediglich einen Wirkungsbereich von wenigen Metern und Radar-Systeme tragen durch eine Zykluszeit von mehr als 60 ms [78] zu einer Erhöhung der Systemlaufzeit⁷ der Kalibrierung bei. Allgemein ist zwischen der erkannten HDG durch die Kamera und der bestimmten Position der Projektionsfläche durch die Umfeldsensorik nicht zwangsläufig eine Übereinstimmung gegeben.

Stereokamera: Im Vergleich zur Sensordatenfusion wird durch den Einsatz eines Stereosystems die Systemkomplexität verringert, da die Position der HDG direkt über die Stereoanalyse bestimmt werden kann. Die Entfernungsbestimmung deckt eine Distanz von über 50 m [43] ab, was für eine Erfassung der HDG ausreichend erscheint. Der Einsatz dieses Systems ist bei lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen nicht üblich. Gegenwärtig werden Komfort- und Sicherheitssysteme wie der Notbremsassistent mit dieser Technik abgedeckt. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung liegt bei Distanzen von 20 m bis 30 m bei ungefähr 20 cm bis 30 cm [47], was bei einer Kameraauflösung von $0,053^\circ$ ungefähr 1-2 Pixel⁸ Unterschied ergibt und damit nahezu keinen Einfluss auf die Bestimmung der Scheinwerferausrichtung hat. Problematisch ist die Notwendigkeit der dauerhaften Kalibrierung der beiden Kameras aufeinander. Eine Bindung der automatisierten Scheinwerfereinstellung an ein Stereokamerasystem würde die Funktion gegenwärtig aufgrund der erhöhten Kosten und der geringen Flexibilität für kamerabasierte Lichtfunktionen im Vergleich zu einem Monokamerasystem unattraktiv machen. Allerdings ist eine zukünftige Umsetzung mittels eines Stereosystems denkbar.

⁶Die prozentualen Angaben der Ausstattungsvarianten beziehen sich auf das Jahr 2012 für den Pkw-Gesamtbestand.

⁷Die Systemlaufzeit der genutzten Entwicklerkamera beträgt 45 ms.

⁸Die Abweichung der Pixel kann über die Simulationsumgebung in Abschnitt 4.4.1 bestimmt werden. Die Kameraauflösung kann aus den Daten in Tabelle D.1 im Anhang D.1 abgeleitet werden.

Aktive Triangulation: Eine Alternative bietet das Prinzip der aktiven Triangulation. Für die Positionsbestimmung mittels aktiver Triangulation sind eine Monokamera und definierte Lichtstrahlen notwendig, deren Abstrahlcharakteristika bekannt sind. Die Lichtstrahlen ersetzen das zweite Kamerasystem eines Stereokamerasystems. Die Monokamera ordnet den detektierten Lichtstrahlen die erfasste Ausrichtung zu. Folglich ist über das Prinzip der Triangulation die Lage der Projektionsfläche relativ zu der Kamera bestimmbar [57]. Dieses Verfahren der aktiven Triangulation lässt sich über eine definierte Verlagerung der HDG und eine nachfolgende Detektion dieser durch die Kamera auf herkömmliche Scheinwerfersysteme übertragen. Durch die ausschließliche Nutzung der Monokamera und der Scheinwerferlichtverteilung wird die Scheinwerferausrichtung der Kameraorientierung angepasst. Herkömmliche kamerabasierte Lichtsysteme haben bei korrekt eingestellten Scheinwerfern das Problem, dass die Orientierung der Kamera und die Ausrichtung der Scheinwerfer toleranzbehaftet sind. Beide Systeme werden nicht aufeinander kalibriert. Durch die Nutzung der aktiven Triangulation wird die Scheinwerferlichtverteilung vollständig auf die Orientierung der Kamera ausgerichtet. Nachfolgend wird von einer optischen Kopplung beider Systeme gesprochen. Eine Verringerung der Gesamtsystemtoleranz ist die Folge. Das Prinzip der aktiven Triangulation wird in Verbindung mit einer automatisierten Scheinwerfereinstellung zum ersten Mal in [153] angewendet und in [71] auf Basis einer aktiven Streifenprojektion aufgegriffen.

Optische Kopplung: Der Begriff der optischen Kopplung wird bereits von *Hummel* [55] verwendet. Dabei sieht er die nach Abschnitt 3.1.1 eingeführte Onlinekalibrierung über Licht- bzw. Schattenmarkierungen als Grundlage für eine optische Kopplung. Dieser Aussage kann unter bekannter und toleranzfreier Geometriebeziehung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn zugestimmt werden. Unter Berücksichtigung der Fahrdynamik bietet lediglich die aktive Triangulation eine Möglichkeit zur optischen Kopplung zwischen Scheinwerfer und Kamera.

3.2.3 HDG-basierte automatisierte Scheinwerfereinstellung

Die HDG-basierte automatisierte Scheinwerfereinstellung erfolgt über eine aktive Triangulation zwischen dem Scheinwerfer und der Kamera und stellt eine neue Art der Onlinekalibrierung dar, wobei auf zusätzliche Lichtmarkierungen verzichtet werden kann und eine optische Kopplung beider Systeme die Folge ist. Die Kalibrierung wird auf der Basis bestehender charakteristischer Punkte der HDG, Abschnitt 3.2.1, durchgeführt und nutzt die integrierten Stellmotoriken des Scheinwerfers, Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2, bzw. schaltbare LED-Segmente, Abschnitt 2.3.4, zur Verlagerung des Lichtbilds. Das Kamerasystem bildet weiterhin das Messinstrument zur Kalibrierung der Hauptscheinwerfer. Zusätzliche Sensorsysteme werden nicht benötigt, siehe Tabelle 3.1. Eine vergleichbare geometrische Auswertung der Umgebung, die in Abschnitt 3.1.1 diskutiert wird, ist nicht mehr notwendig [153].

Der Kalibriervorgang sieht vor, verschiedene charakteristische Punkte der HDG durch das Kamerasystem zu erkennen und deren Orientierungen aus der

Kameraperspektive zu speichern. Für die herkömmliche Lichteinstellung ist der H0V0-Punkt als ein charakteristischer Punkt bekannt, Abschnitt 2.4. Durch die Verlagerung der Ausrichtung des H0V0-Punkts über die interne Stellmotorik des Scheinwerfers können die zusätzlich geforderten charakteristischen Punkte generiert werden, Abbildung 3.7. Ähnliches gilt für Matrixscheinwerfersysteme, wobei durch das Zu- oder Abschalten einzelner Lichtsegmente eine Verlagerung der HDG, genauer des H0V0-Punkts, möglich ist. Die Nutzung adaptiver Lichtsysteme zur Ausführung der automatisierten Scheinwerfereinstellung ist somit denkbar. Ein dem Trackingverfahren folgendes Berechnungsverfahren bestimmt aus den fehlerbehafteten Soll-Lagen der HDG und den durch die Kamera gespeicherten Orientierungen die Fehlstellungen der Hauptscheinwerfer. Der Kalibriervorgang liefert die Ausrichtung der Hauptscheinwerfer im Koordinatensystem der Kamera, Abschnitt 3.2.2.

Tabelle 3.1: Verringerung der Systembestandteile für das Kalibrierverfahren mittels aktiver Triangulation

verfügbare Systembestandteile		
Merkmale der Lichtverteilung	Fahrerassistenzkamera	Umfeldsensoren
Kalibriermarke	Monokamera	Abstandsradar
Hell-Dunkel-Grenze	Stereokamera	Ultraschallsensoren Niveausensoren
genutzte Systembestandteile		
Merkmale der Lichtverteilung	Fahrerassistenzkamera	Umfeldsensoren
-	Monokamera	-
Hell-Dunkel-Grenze	-	-

Grundsätzlich können zwei Varianten der HDG-basierten Scheinwerfereinstellung unterschieden werden. Bei der passiven Variante wird die Scheinwerferbewegung mit der Kameraerkennung synchronisiert. Verschiedene Positionen des Scheinwerferlichtbilds, abhängig von den Verfahrwinkeln der Stellmotoriken oder den angesteuerten Matrixsegmenten, werden den Pixelpositionen des Kamerabilds zugeordnet. Ein Eingriff des Kalibrierverfahrens in die Scheinwerfersteuerung wird nicht vorgenommen. Eine finale Auswertung der gesammelten Informationen liefert die Fehlstellungen der Scheinwerfer. Notwendig ist an dieser Stelle ein bidirektionaler Austausch zwischen der Scheinwerfersteuerung und der Bildverarbeitung zur Gewährleistung der angesprochenen Synchronisierung. Für den Fahrer ist diese Form der Kalibrierung nicht wahrnehmbar.

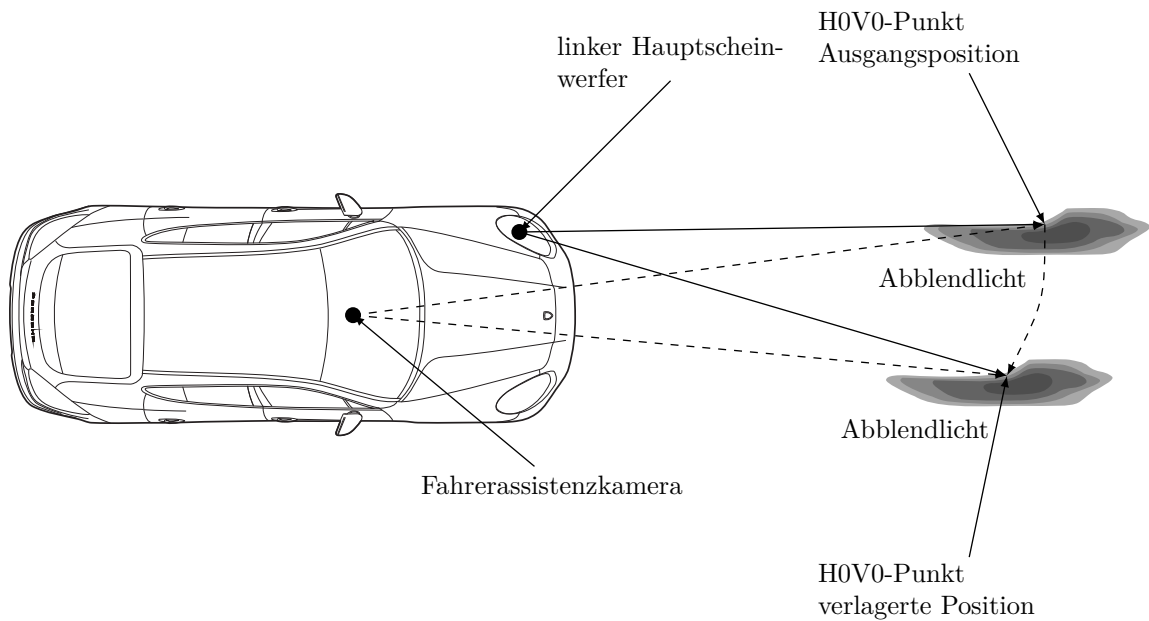


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der HDG-basierten Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation für den linken Scheinwerfer

Die aktive Variante sieht eine definierte Verlagerung des Lichtbilds vor, wenn über die Kamera eine Detektion der HDG möglich ist. Die Erkennung durch die Kamera initialisiert den Kalibriervorgang. Die Ansteuerung der Hauptscheinwerfer ist Gegenstand des Kalibrierverfahrens und definiert die Zeitpunkte, in denen eine Detektion durch die Kamera eingeleitet wird. Der Kalibrierprozess ist theoretisch durch den Fahrer wahrnehmbar. Die Synchronisierung ist mit Fokus auf die Latenzzeiten zwischen Kamera- und Scheinwerfersteuergerät als deutlich einfacher gegenüber der passiven Variante einzuschätzen.

Der Systemablauf der aktiven Variante, Kapitel 5, unterscheidet sich lediglich in der Synchronisierung zwischen Scheinwerfer und Kamera, Abschnitt 5.2, von der passiven Variante. Das Berechnungsverfahren und die Bildverarbeitungsoperationen sind vollständig übertragbar, Abschnitte 5.1 und 5.3. Für die nachfolgende Betrachtung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation wird die aktive Variante verfolgt.

4 Theoretische Umsetzung der aktiven Triangulation

Im nachfolgenden Teil der Arbeit wird eine theoretische Betrachtung des abgeleiteten Verfahrens zur automatisierten Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung, vergleiche Kapitel 3, durchgeführt. Grundlegend wird eine Beschreibung für die geometrische Lage der HDG im Raum mit unbekannter vertikaler und horizontaler Fehlstellung und eine Darstellung für die Detektionscharakteristik der Kamera eingeführt, Abschnitt 4.1. Das durch die aktive Triangulation bedingte Zusammenwirken zwischen der HDG eines jeden Scheinwerfers mit der Kamera wird in einem vereinfachten Modell herausgearbeitet. Darüber hinaus wird die Erzeugung definierter Testvektoren erläutert, Abschnitt 4.2.

Auf der Basis des vereinfachten Modellansatzes wird ein Lösungsweg zur Bestimmung der vertikalen und der horizontalen Fehlstellung dargestellt, Abschnitt 4.3. Eine abschließende Verifizierung des Berechnungsverfahrens legt die theoretischen Grenzen der automatisierten Scheinwerfereinstellung hinsichtlich der Geometriebeziehungen zwischen Fahrzeug und Umgebung, des Diskretisierungsgrads der Kamera und der Winkelverteilung im Kontext der aktiven Triangulation dar, Abschnitt 4.4.

4.1 Mathematische Definitionen

Die automatisierte Scheinwerfereinstellung nutzt als grundlegendes Prinzip die Triangulation zwischen einer scheinwerferspezifischen Abstrahlrichtung und einer kameraspezifischen Detektionsrichtung. Folglich sind mathematische Grundannahmen für den Scheinwerfer und für die Kamera zu treffen.

Unter der Annahme, dass die HDGs des linken und des rechten Scheinwerfers identische Geometriebeziehungen aufweisen, werden in diesem Abschnitt alle entsprechenden Definitionen für den linken Scheinwerfer vorgenommen. Eine vollständige Übertragung dieser auf den rechten Scheinwerfer ist möglich. Gegenstand der Betrachtungen ist keine lichttechnische Beurteilung der Scheinwerfer, vielmehr steht eine Erfassung der geometrischen Orientierung der HDG im Vordergrund, Abschnitt 4.1.1.

Für die Detektionsbereiche der Fahrerassistentenkamera werden die Kalibriermatrizen der herstellereinspezifischen Kalibrierung verwendet, Abschnitt 4.1.2.

4.1.1 Geometrische Orientierung der Hell-Dunkel-Grenze

Das charakteristische Merkmal der Lichtverteilung zur Umsetzung des beschriebenen Kalibrierverfahrens ist die HDG, Abschnitt 3.2.3. Im weiteren Verlauf wird die HDG durch den in Abschnitt 2.1.1 eingeführten H0V0-Punkt beschrieben. Die Orientierung der HDG wird resultierend durch einen Vektor, den H0V0-Vektor, dargestellt. Dieser verbindet den abgebildeten H0V0-Punkt im Raum mit dem optischen Zentrum¹ des Scheinwerfers. In guter Näherung kann die optische Achse des Scheinwerfers als H0V0-Vektor definiert werden.

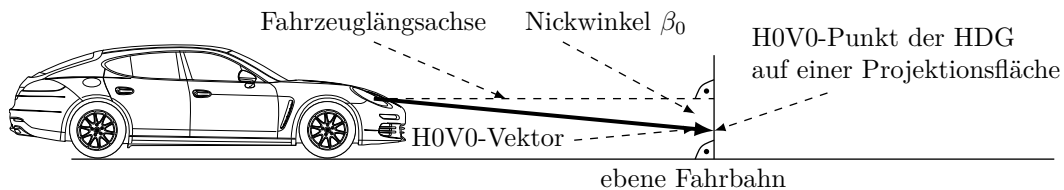


Abbildung 4.1: Darstellung des H0V0-Vektors in der Seitenansicht

Der H0V0-Vektor ist entsprechend den gesetzlichen Rahmenbedingungen, Abschnitt 2.4, um einen definierten Nickwinkel β_0 gegenüber der Längsachse des Fahrzeugs nach unten zu neigen. Dementsprechend wird eine seitliche Verdrehung des H0V0-Vektors gegenüber derselben Längsachse als Scheinwerfer-Gierwinkel α_0 eingeführt. Der Scheinwerfer-Gierwinkel ist auf $\alpha_0 = 0^\circ$ einzustellen. Es wird ferner die Annahme getroffen, dass die Koordinatenachsen des Scheinwerfers auch im Fall einer Fehlstellung ortsfest sind. Diese Annahme wird durch das Auftreten kleiner Winkel gerechtfertigt, wobei in realen Scheinwerfersystemen in diesem Fall von nicht ortsfesten Scheinwerferachsen ausgegangen werden kann, vergleiche hierzu Abschnitt 5.3.1 sowie [141].

Zur Darstellung des H0V0-Vektors wird ein Richtungsvektor \vec{p} eingeführt, der identisch zur Längsachse des Fahrzeugs orientiert ist. Die Beschreibung des Richtungsvektors \vec{p} und die Drehungen mit α_0 in horizontaler und mit β_0 in vertikaler Richtung über Drehmatrizen^{2 3} im Subkoordinatensystem des Scheinwerfers definieren die Scheinwerferausrichtung, Gleichung (4.1). Die Anordnung der Drehmatrizen ist von Bedeutung und wird in Abschnitt 5.3.1 näher betrachtet. Die beschriebene Orientierung des H0V0-Vektors ist in diesem Fall für den gesamten Scheinwerfer relativ zum Fahrzeug zu sehen, vergleiche Abbildung 4.1.

$$\vec{p}_{0,SW} = D_{z,SW}(\alpha_0) \cdot D_{y,SW}(\beta_0) \cdot \vec{p} \quad (4.1)$$

¹Die Mitte auf der Oberfläche der Linse wird als optisches Zentrum des Scheinwerfers definiert und aus den CAD-Daten des Fahrzeugs bestimmt.

²Die Drehwinkel um die Drehachsen sind in Richtung des Ursprungs im mathematisch positiven Sinn zu verstehen.

³Die Drehmatrix $D_{z,SW}$ beschreibt eine Drehung um die z-Achse, die Drehmatrix $D_{y,SW}$ beschreibt eine Drehung um die y-Achse, siehe hierzu Abbildung 4.3.

Die Scheinwerferfehlstellungen verändern den Scheinwerfer-Gierwinkel und den Scheinwerfer-Nickwinkel. Eine horizontale Fehlstellung α ändert den Scheinwerfer-Gierwinkel, Gleichung (4.2).

$$\alpha_{0'} = \alpha_0 + \alpha \quad (4.2)$$

Eine vertikale Fehlstellung β ändert den Scheinwerfer-Nickwinkel, Gleichung (4.3).

$$\beta_{0'} = \beta_0 + \beta \quad (4.3)$$

Es wird die Annahme getroffen, dass die Grundeinstellung des Scheinwerfers in horizontaler Richtung $\alpha_0 = 0^\circ$ und in vertikaler Richtung $\beta_0 = 0^\circ$ beträgt. Im Hinblick auf die Soll-Einstellwerte des Scheinwerfers können diese durch die horizontale Fehlstellung α und die vertikale Fehlstellung β beschrieben werden. Die Fehlstellung der geometrischen Ausrichtung des H0V0-Vektors wird durch die Gleichung (4.4) mit $\vec{p}_{0,SW} = (1, 0, 0)^T$ definiert.

$$\vec{p}_{SW}(\alpha, \beta) = D_{z,SW}(\alpha) \cdot D_{y,SW}(\beta) \cdot \vec{p}_{0,SW} \quad (4.4)$$

Die Eingliederung der geometrischen Orientierung der HDG in ein globales Koordinatensystem erfolgt durch die mathematische Beschreibung der Fehlstellung des Scheinwerfers, Gleichung (4.4), und durch die Position⁴ des Subkoordinatensystems des Scheinwerfers $\vec{s}_{0,1}$ im Hinblick auf den Ursprung eines globalen Koordinatensystems, Gleichung (4.5).

$$\vec{p}_{global}(\alpha, \beta) = s \cdot \vec{p}_{SW}(\alpha, \beta) + \vec{s}_{0,1} \quad (4.5)$$

Die Variable s definiert die Entfernung des linken Scheinwerfers bis zu dem Teil der Projektionsfläche, auf dem die HDG und damit auch der H0V0-Punkt abgebildet werden, Abschnitt 4.2.

4.1.2 Detektionsbereiche der Fahrerassistenzkamera

Die Fahrerassistenzkamera ermöglicht eine geometrische Erfassung des auf einer Projektionsfläche abgebildeten H0V0-Punkts des Scheinwerfers, Abschnitt 4.2. Berücksichtigt werden muss, dass der Erfassungsbereich diskret ist, siehe Abbildung 4.2. Zur mathematischen Definition des Detektionsbereichs werden die geometrischen Orientierungen der einzelnen diskreten Erfassungsbereiche betrachtet. Den einzelnen Pixeln des Kamerabilds $\vec{i}(n, m)$ wird über die Kalibriermatrix $\mathcal{K}(\vec{i}(n, m))$, Zuordnungsvorschrift (4.6), je ein Detektionsbereich⁵, genauer die geometrische Orientierung des Zentrums des Detektionspixels, im Subkoordinatensystem der Fahrerassistenzkamera zugeordnet.

⁴Für die Position des Scheinwerfers wird das optische Zentrum des Scheinwerfers angenommen.

⁵Der Detektionsbereich ist in Kugelkoordinaten im Gradmaß dargestellt.



Abbildung 4.2: Fahrerassistenzkamerabild und Ausschnitt der Kamerapixel

$$\mathcal{K} : \mathbb{Z}_{\geq 0}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3 : \mathcal{K}(n, m) := \mathcal{K}(\vec{i}(n, m)) \mapsto \vec{k}_{n,m} \quad (4.6)$$

Die Kalibriermatrix wird durch die intrinsische Kalibrierung der Kamera und die extrinsische Kalibrierung beim Einbau der Kamera in das Fahrzeug erzeugt, Abschnitt 2.3.1. Der Kamerarichtungsvektor $\vec{k}_{n,m} = (\mathbf{r}, \varphi, \vartheta)^T$ definiert einen Vektor im Kugelkoordinatensystem. Die Indizes n und m geben die Pixelposition auf dem Kamerabild an. Dabei steht n für die Zeile und m für die Spalte. Für das weitere Vorgehen wird der Kamerarichtungsvektor $\vec{k}_{n,m}$ in kartesische Koordinaten umgewandelt.

$$k_{n,m,x} = 1 \quad (4.7)$$

$$k_{n,m,y} = \frac{\sin(\varphi_{n,m})}{\cos(\varphi_{n,m})} \quad (4.8)$$

$$k_{n,m,z} = \frac{\sin(\vartheta_{n,m})}{\cos(\vartheta_{n,m}) \cdot \cos(\varphi_{n,m})} \quad (4.9)$$

Der resultierende Vektor in kartesischen Koordinaten wird durch $\vec{k}_{n,m}$ beschrieben. Die Anbauposition⁶ der Kamera wird durch \vec{r}_0 angegeben. Der Detektionsbereich der Fahrerassistenzkamera ist in einem globalen Koordinatensystem folglich durch die Gleichung (4.10) definiert.

$$\vec{k}_{n,m,\text{global}} = r \cdot \vec{k}_{n,m} + \vec{r}_0 \quad (4.10)$$

Die Variable r gibt die Entfernung der Fahrerassistenzkamera bis zu dem Teil der Projektionsfläche an, auf dem der H0V0-Punkt des Scheinwerfers abgebildet wird, falls $\|\vec{k}_{n,m}\| = 1$ gilt.

⁶Für die Position der Kamera im Fahrzeug wird die Mitte der Oberfläche der Abbildungslinse verwendet.

4.2 Geometriemodell

Das Geometriemodell zeigt das geometrische Zusammenwirken der definierten Scheinwerferausrichtung und der Detektionscharakteristik der Fahrerassistenzkamera, Abbildung 4.3. Durch die Annahme variabler Projektionsflächen im globalen Koordinatensystem, Abschnitt 4.2.1, wird ein Zusammenhang zwischen dem Subkoordinatensystem des Scheinwerfers und dem Subkoordinatensystem der Kamera unter Kenntnis der mathematischen Definitionen aus Abschnitt 4.1 gebildet. Eine Darstellung des HOV0-Punkts im Koordinatensystem der Kamera ist im weiteren Verlauf die Folge, Abschnitt 4.2.2. Auf der Basis der bekannten Informationen sind Testvektoren für die Verifizierung des Berechnungsverfahrens, Abschnitt 4.3.2, in der Simulationsumgebung, Abschnitt 4.4.1, ableitbar, Abschnitt 4.2.3.

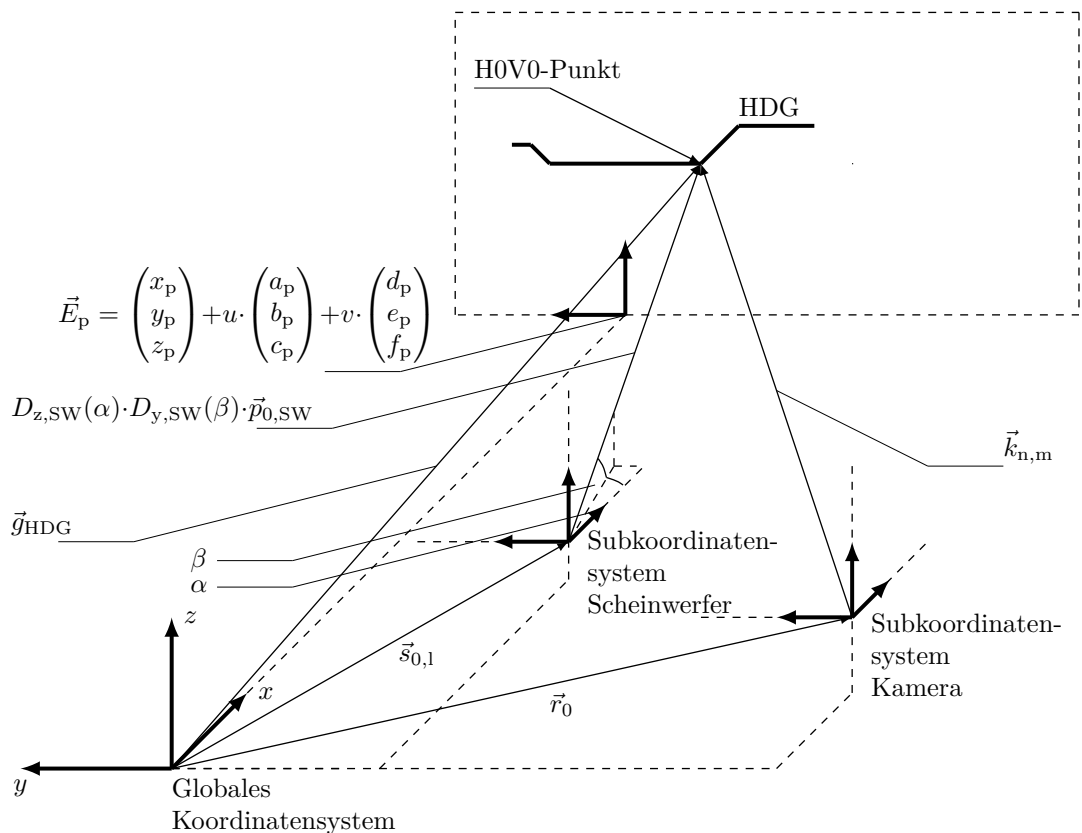


Abbildung 4.3: Idealisierte geometrische Beziehungen zwischen dem linken Hauptscheinwerfer und der Fahrerassistenzkamera im globalen Koordinatensystem

4.2.1 Projektionsflächen

Die HDG des Hauptscheinwerfers wird auf eine Fläche abgebildet, Abbildung 4.3. Modellhaft wird diese als Ebene \vec{E} dargestellt. Unter der Annahme einer beliebigen Oberfläche wird das Modell einer Projektionsfläche durch zusätzliche Ebenen \vec{E}_p erweitert, ähnlich der Methode der finiten Elemente [62]. Der Aufpunkt der

Ebene wird durch den Vektor $(x_p, y_p, z_p)^T$ definiert. Die Vektoren, die die Ebene aufspannen, werden durch $(a_p, b_p, c_p)^T$ und durch $(d_p, e_p, f_p)^T$ beschrieben. Die Skalierungsfaktoren u und v komplettieren die Ebenengleichungen, Gleichung (4.11). Drehmatrizen ermöglichen eine zusätzliche Verdrehung der jeweiligen Fläche⁷.

$$\vec{E}_p = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} + u \cdot D_x(\gamma) \cdot D_z(\epsilon) \cdot D_y(\delta) \cdot \begin{pmatrix} a_p \\ b_p \\ c_p \end{pmatrix} + v \cdot D_x(\gamma) \cdot D_z(\epsilon) \cdot D_y(\delta) \cdot \begin{pmatrix} d_p \\ e_p \\ f_p \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Nach Abschnitt 4.1.1 ist der H0V0-Vektor für die geometrische Orientierung der Scheinwerfer von Bedeutung, wodurch die auf verschiedenen Ebenen gründende Modellannahme auf Abstandsinformationen reduziert werden kann. Die Ebenen \vec{E}_p sind als infinitesimal kleine Flächen anzusehen. Für das Referenzmessverfahren im Labor, Abschnitt 6.1.3, ist im Hinblick auf die Positioniergenauigkeit des Fahrzeugs vor einer Projektionsfläche die Nutzung einer Ebene ausreichend. Im Folgenden wird Gleichung (4.11) vereinfacht und als Ausgangspunkt für weitere Berechnungen verwendet.

$$\vec{E}_p = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} + u \cdot \begin{pmatrix} a_p \\ b_p \\ c_p \end{pmatrix} + v \cdot \begin{pmatrix} d_p \\ e_p \\ f_p \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Die Variablen a_p, b_p, c_p, d_p, e_p und f_p enthalten die Informationen der Drehmatrizen.

4.2.2 Parallaxe zwischen Kamera und Scheinwerfer

Der geometrische Zusammenhang zwischen den Subkoordinatensystemen und einer Projektionsebene im globalen Koordinatensystem ist beispielhaft Abbildung 4.3 zu entnehmen. Da die Scheinwerfer und die Fahrerassistenzkamera starr über die Karosserie miteinander verbunden sind, wird ein Gieren, Wanken oder Rollen des Fahrzeugs vor der Projektionsfläche mittels Gleichung (4.12) beschrieben.

Für die Bestimmung des H0V0-Punkts auf der Projektionsfläche aus der Kameraperspektive \vec{k} sind Informationen bezüglich der Orientierung des Hauptscheinwerfers, Gleichung (4.4), der Position der Projektionsfläche zum globalen Ursprung, Gleichung (4.12), und der Anbauposition der Kamera \vec{r}_0 , Abschnitt 4.1.2, notwendig.

Das resultierende Gleichungssystem zur Bestimmung der Position des H0V0-Punkts wird wie folgt gebildet:

⁷Die Anordnung der Drehmatrizen ist als beispielhaft zu verstehen.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} + u \cdot \begin{pmatrix} a_p \\ b_p \\ c_p \end{pmatrix} + v \cdot \begin{pmatrix} d_p \\ e_p \\ f_p \end{pmatrix}}_{\text{Projektionsebene } \vec{E}_p} = \underbrace{\begin{pmatrix} s_{0,1,x} \\ s_{0,1,y} \\ s_{0,1,z} \end{pmatrix}}_{\vec{s}_{0,1}} + s \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} p_{\text{SW},x}(\alpha, \beta) \\ p_{\text{SW},y}(\alpha, \beta) \\ p_{\text{SW},z}(\alpha, \beta) \end{pmatrix}}_{\vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta)} \quad (4.13)$$

H0V0 -Vektor global

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} + u \cdot \begin{pmatrix} a_p \\ b_p \\ c_p \end{pmatrix} + v \cdot \begin{pmatrix} d_p \\ e_p \\ f_p \end{pmatrix}}_{\text{Projektionsebene } \vec{E}_p} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_{0,x} \\ r_{0,y} \\ r_{0,z} \end{pmatrix}}_{\vec{r}_0} + \underbrace{\begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{pmatrix}}_{\vec{k}} \quad (4.14)$$

Das Gleichungssystem (4.13) wird nach v aufgelöst, Gleichung (4.15), wobei die Ausdrücke $\Delta x = x_p - s_{0,1,x}$, $\Delta y = y_p - s_{0,1,y}$ und $\Delta z = z_p - s_{0,1,z}$ zur Vereinfachung der Darstellung eingeführt werden. Durch die Lösung in Gleichung (4.15) wird die zweite Variable u des Gleichungssystems bestimmt, Gleichung (4.16). Zur vollständigen Darstellung wird in Gleichung (4.17) die Auflösung nach der fehlenden Variablen s angegeben.

$$v = \frac{-\Delta z + \frac{\Delta x \cdot p_{\text{SW},z}}{p_{\text{SW},x}} + \frac{\Delta y \cdot p_{\text{SW},x} \cdot c_p - \Delta x \cdot p_{\text{SW},y} \cdot c_p - \Delta y \cdot p_{\text{SW},z} \cdot a_p}{b_p \cdot p_{\text{SW},x} - a_p \cdot p_{\text{SW},y}} + \frac{\Delta x \cdot p_{\text{SW},y} \cdot p_{\text{SW},z} \cdot a_p}{p_{\text{SW},x} \cdot (b_p \cdot p_{\text{SW},x} - a_p \cdot p_{\text{SW},y})}}{f_p - \frac{d_p \cdot p_{\text{SW},z}}{p_{\text{SW},x}} + \frac{d_p \cdot c_p \cdot p_{\text{SW},y} - e_p \cdot c_p \cdot p_{\text{SW},x} + e_p \cdot a_p \cdot p_{\text{SW},z}}{b_p \cdot p_{\text{SW},x} - a_p \cdot p_{\text{SW},y}} - \frac{a_p \cdot d_p \cdot p_{\text{SW},y} \cdot p_{\text{SW},z}}{p_{\text{SW},x} \cdot (b_p \cdot p_{\text{SW},x} - a_p \cdot p_{\text{SW},y})}} \quad (4.15)$$

$$u = \frac{p_{\text{SW},x} \cdot \left(\Delta x \cdot \frac{p_{\text{SW},y}}{p_{\text{SW},x}} + \frac{v \cdot d_p \cdot p_{\text{SW},y}}{p_{\text{SW},x}} - v \cdot e_p - \Delta y \right)}{b_p \cdot p_{\text{SW},x} - a_p \cdot p_{\text{SW},y}} \quad (4.16)$$

$$s = \frac{\Delta x + u \cdot a_p + v \cdot d_p}{p_{\text{SW},x}} \quad (4.17)$$

Durch Einsetzen der Skalierungsfaktoren u und v in die Ebenengleichung, Gleichung (4.12) aus Abschnitt 4.2.1, wird der Vektor \vec{g}_{HDG} bestimmt, der den Schnittpunkt zwischen dem H0V0-Vektor des Scheinwerfers mit der Projektionsfläche im globalen Koordinatensystem beschreibt, Gleichung (4.18).

$$\mathcal{G}(\vec{E}_p, \vec{s}_{0,1}, \vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta)) = \vec{E}_p(u, v(u)) = \vec{g}_{\text{HDG}} \quad (4.18)$$

Ausgehend von der bekannten Position des H0V0-Punkts auf der Projektionsfläche, Gleichung (4.18), wird mittels Gleichung (4.14) die Detektionsrichtung der Kamera unter Kenntnis der Anbauposition der Fahrerassistenzkamera \vec{r}_0 bestimmt.

$$\vec{k} = \vec{g}_{\text{HDG}} - \vec{r}_0 \quad (4.19)$$

4.2.3 Testvektoren

Der in Abschnitt 3.2.3 erläuterte Ansatz der automatisierten Scheinwerfereinstellung sieht eine Zuordnung der Scheinwerferausrichtung in Form des HOV0-Vektors zu der entsprechenden Detektionsrichtung der Kamera vor. Die in Abschnitt 4.2.2 bestimmte Detektionsrichtung der Kamera \vec{k} ist als kontinuierlich zu betrachten, Gleichung (4.22). Aus Abschnitt 4.1.2 ist bekannt, dass die Detektionscharakteristik der Fahrerassistenzkamera diskret ist und die Zentren der einzelnen Detektionsbereiche $\vec{k}_{n,m}$ für die Lagebestimmung in kartesischen Koordinaten genutzt werden. Folglich ist eine Diskretisierung der berechneten Detektionsrichtung der Kamera \vec{k} zweckmäßig. Gleichung (4.14) wird wie folgt ersetzt:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} + u \cdot \begin{pmatrix} a_p \\ b_p \\ c_p \end{pmatrix} + v \cdot \begin{pmatrix} d_p \\ e_p \\ f_p \end{pmatrix}}_{\text{Projektionsebene } \vec{E}_p} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_{0,x} \\ r_{0,y} \\ r_{0,z} \end{pmatrix}}_{\vec{r}_0} + r \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} k_{n,m,x} \\ k_{n,m,y} \\ k_{n,m,z} \end{pmatrix}}_{\vec{k}_{n,m}} \quad (4.20)$$

Detektionsbereich global

Für die Diskretisierung des Kameravektors wird die ursprüngliche Detektionsrichtung \vec{k} in Kugelkoordinaten \vec{k} umgewandelt und eine inverse Zuordnungsvorschrift (4.21), entsprechend Abschnitt 4.1.2, Zuordnungsvorschrift (4.6), angewendet, wodurch die korrespondierende Pixelposition auf dem Kamerabild $\vec{i}(n, m)$ bestimmt wird, Gleichung (4.23).

$$\mathcal{K}^{-1} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{Z}_{\geq 0}^2 : \mathcal{K}^{-1}(\vec{k}_{n,m}) \mapsto \vec{i}(n, m) \quad (4.21)$$

Der resultierenden Pixelposition $\vec{i}(n, m)$ kann durch die Anwendung der Zuordnungsvorschrift die gesuchte diskrete Detektionsrichtung $\vec{k}_{n,m}$ zugeordnet werden, Gleichung (4.24). Im Hinblick auf das in Abschnitt 4.3.2 abgeleitete Berechnungsverfahren führt die Diskretisierung zu einer Beeinflussung des Kalibrierergebnisses, Abschnitt 4.4.2.

$$\mathcal{S}_{\text{kont}}(\mathcal{G}(\vec{E}_p, \vec{s}_{0,1}, \vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta)), \vec{r}_0) = \mathcal{G}(\vec{E}_p, \vec{s}_{0,1}, \vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta)) - \vec{r}_0 = \vec{k} \quad (4.22)$$

$$\mathcal{K}^{-1}(\mathcal{S}_{\text{kont,Kugel}}(\mathcal{G}(\vec{E}_p, \vec{s}_{0,1}, \vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta)), \vec{r}_0)) = \vec{i}(n, m) \quad (4.23)$$

$$\mathcal{K}(\mathcal{K}^{-1}(\mathcal{S}_{\text{kont,Kugel}}(\mathcal{G}(\vec{E}_p, \vec{s}_{0,1}, \vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta)), \vec{r}_0))) = \vec{k}_{n,m} \quad (4.24)$$

Die angeführten Pixelpositionen $\vec{i}(n, m)$ und die ableitbaren diskreten Detektionsrichtungen $\vec{k}_{n,m}$ können als Testvektoren für eine Verifizierung des sich ergebenden Berechnungsverfahrens, Abschnitt 4.3.2, angesehen werden, Abschnitt 4.4. Abschließend beschreiben die Eingangsgrößen der Gleichung (4.24) das Szenario einer Kalibriersituation. Die berechneten Detektionsrichtungen $\vec{k}_{n,m}$ liefern die Informationen,

die über die Kamera aus der Situation ermittelt werden können und für die Ausführung des Kalibrierverfahrens notwendig sind. Zusätzlich besteht im Zuge der experimentellen Untersuchungen die Möglichkeit, die Lage des H0V0-Punkts unter bekannten Geometriebeziehungen zu visualisieren, Abschnitt 6.1.3.

4.3 Bestimmung der Scheinwerferfehlstellungen

Für das Berechnungsverfahren werden verschiedene linear unabhängige H0V0-Vektoren genutzt, Abbildung 4.4, was eine Erweiterung des Geometriemodells erfordert, Abschnitt 4.3.1. Grundsätzlich sind für die Berechnung der horizontalen Fehlstellung α und der vertikalen Fehlstellung β lediglich die Anbauinformation der Hauptscheinwerfer $\vec{s}_{0,1}$ und der Fahrerassistenzkamera \vec{r}_0 sowie die Kamerapixelposition $\vec{i}(n, m)$ der abgebildeten H0V0-Punkte notwendig, sofern zwei unabhängige Orientierungen der H0V0-Vektoren berücksichtigt werden, Abschnitt 4.3.2.

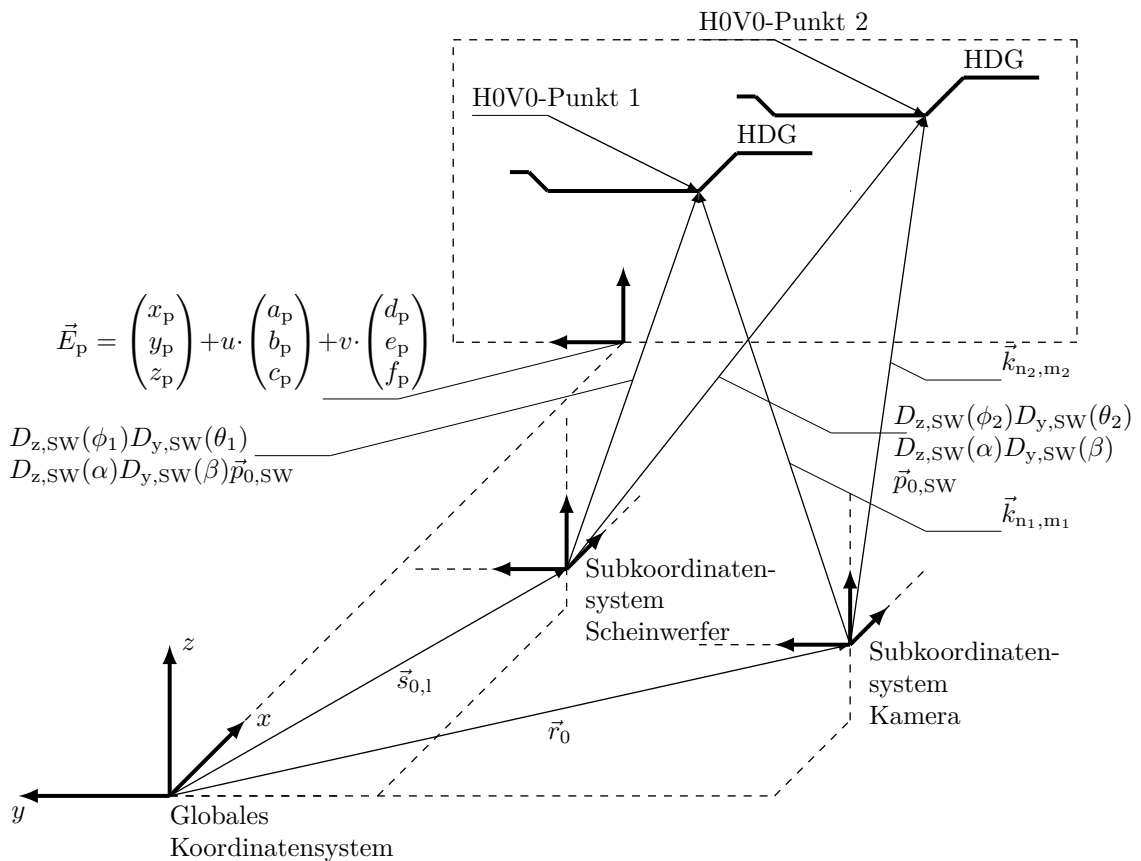


Abbildung 4.4: Idealisierte geometrische Beziehungen zwischen zwei H0V0-Punkten und der Fahrerassistenzkamera im globalen Koordinatensystem

4.3.1 Erweiterung des Geometriemodells

Das Geometriemodell aus Abschnitt 4.2 wird durch die Variante erweitert, den H0V0-Vektor der HDG durch die internen Stellmotoren, Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2, in horizontaler und vertikaler Richtung zu verlagern. Eine horizontale Bewegung wird im Scheinwerferkoordinatensystem durch die Drehung um die z-Achse mit dem Winkel ϕ beschrieben, für eine vertikale Drehung wird um die y-Achse mit dem Winkel θ gedreht. Die Annahme der ortsfesten Scheinwerferachsen bleibt bestehen, Abschnitt 4.1.1, was eine Erweiterung der Ausgangsgleichung (4.4) durch zwei zusätzliche Drehmatrizen erfordert⁸. Die resultierende Gleichung (4.25) gibt die beliebige Verlagerung des H0V0-Vektors der HDG durch den Einsatz der Stellmotoren an. Abbildung 4.4 zeigt die mathematisch beschriebene Verlagerung der HDG zur Generierung eines zweiten H0V0-Punkts.

$$\vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (4.25)$$

Die Variation des H0V0-Vektors durch die Stellmotorik wird mit dem Ziel genutzt, die Anzahl p der zu untersuchenden H0V0-Vektoren $\vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p)$ in einem Szenario zu erhöhen, ohne weitere charakteristische Merkmale der HDG nutzen zu müssen. Die Notwendigkeit für die Erhöhung der Anzahl der charakteristischen Punkte liegt in der mathematischen Lösbarkeit des Gesamtsystems, Abschnitt 4.3.2, und in der diskreten Detektionscharakteristik der Kamera begründet, Abschnitt 4.4.2. Jeder verlagerte H0V0-Vektor $\vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p)$ beinhaltet weiterhin die Scheinwerferfehlstellung α und β .

Die Beschreibung der Verlagerung der H0V0-Vektoren mittels der Stellmotoren kann auch auf Matrixscheinwerfersysteme, Abschnitt 2.3.4, mit schaltbaren LED-Segmenten übertragen werden. Das dynamische Kurvenlicht wird in diesem Fall durch ein Zuschalten bzw. ein Abschalten einzelner LED-Pixel realisiert, wobei die entstehende HDG den charakteristischen H0V0-Punkt wiederum erzeugt. Abweichende Modellansätze hinsichtlich der Drehmatrizenanordnung werden in Abschnitt 5.3.1 diskutiert und in Abschnitt 6.3.1 experimentell untersucht.

4.3.2 Berechnungsverfahren

Das Berechnungsverfahren dient der Bestimmung der Fehlstellung der Hauptscheinwerfer. Die horizontalen und vertikalen Fehlstellungen werden als veränderliche Variablen α und β angesehen, vergleiche Abschnitt 4.1.1. Nachfolgend wird ein Gleichungssystem definiert, wonach auf Basis der aktiven Triangulation zwischen Scheinwerfer und Kamera die Fehlstellungen α und β bestimmt werden können. Der Ansatz der Berechnungsvorschrift beruht auf den Ausgangsgleichungen (4.13) und (4.20) aus den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3. Die eingeführten Projektionsebenen, Abschnitt

⁸ $D_{z,\text{SW}}(\phi)$ beschreibt den Einsatz des Stellmotors für das Kurvenlicht, $D_{y,\text{SW}}(\theta)$ beschreibt den Einsatz des Stellmotors für die Leuchtweitenregulierung.

4.2.1, auf denen die durch die Kamera detektierten H0V0-Punkte abgebildet werden, bilden das Bindeglied zwischen Scheinwerfer und Kamera. Jedem H0V0-Vektor $\vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p)$ wird ein diskreter Kameravektor \vec{k}_{n_p, m_p} zugeordnet. Im Zuge der Erweiterung des Geometriemodells, Abschnitt 4.3.1, werden die Stellmotoren ebenfalls berücksichtigt. Die Basisgleichung (4.26) für das Berechnungsmodell ist das Resultat der Ausgangsgleichungen (4.13) und (4.20) und der erweiterten Beschreibung der H0V0-Vektoren.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} s_{0,1,x} \\ s_{0,1,y} \\ s_{0,1,z} \end{pmatrix}}_{\vec{s}_{0,1}} + s \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} p'_{\text{SW},x}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) \\ p'_{\text{SW},y}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) \\ p'_{\text{SW},z}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) \end{pmatrix}}_{\vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p)} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_{0,x} \\ r_{0,y} \\ r_{0,z} \end{pmatrix}}_{\vec{r}_0} + r \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} k_{n_p, m_p, x} \\ k_{n_p, m_p, y} \\ k_{n_p, m_p, z} \end{pmatrix}}_{\vec{k}_{n_p, m_p}} \quad (4.26)$$

H0V0 -Vektor global *Detektionsbereich global*

Die Basisgleichung (4.26) besitzt mit s , r , α und β vier unbekannte Variablen, folglich sind mindestens zwei unabhängige Beziehungen zwischen Scheinwerfer und Kamera mit identischen Fehlstellung α und β für das Finden der Lösung notwendig. Durch die in Abschnitt 4.3.1 definierte Verlagerung des H0V0-Vektors ergibt sich ein lösbares Gleichungssystem mit sechs Unbekannten.

aus

$$s_1 \cdot D_{z,SW}(\phi_1) D_{y,SW}(\theta_1) D_{z,SW}(\alpha) D_{y,SW}(\beta) \vec{p}_{0,SW} - r_1 \cdot \vec{k}_{n_1,m_1} = \vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1}$$

$$s_2 \cdot D_{z,SW}(\phi_2) D_{y,SW}(\theta_2) D_{z,SW}(\alpha) D_{y,SW}(\beta) \vec{p}_{0,SW} - r_2 \cdot \vec{k}_{n_2,m_2} = \vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1}$$

mit

$$s_1 \cdot \underbrace{D_{z,SW}(\alpha) D_{y,SW}(\beta)}_{\vec{l}_{n_1,m_1}} \cdot \underbrace{\vec{p}_{0,SW}}_{\vec{q}_{0,1,1}} - \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$r_1 \cdot \underbrace{D_{y,SW}(\theta_1)^T D_{z,SW}(\phi_1)^T \vec{k}_{n_1,m_1, \text{Kamera}}}_{\vec{l}_{n_1,m_1}} = \underbrace{D_{y,SW}(\theta_1)^T D_{z,SW}(\phi_1)^T (\vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1})}_{\vec{q}_{0,1,1}}$$

$$s_2 \cdot \underbrace{D_{z,SW}(\alpha) D_{y,SW}(\beta)}_{\vec{l}_{n_2,m_2}} \cdot \underbrace{\vec{p}_{0,SW}}_{\vec{q}_{0,1,2}} - \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$r_2 \cdot \underbrace{D_{y,SW}(\theta_2)^T D_{z,SW}(\phi_2)^T \vec{k}_{n_2,m_2, \text{Kamera}}}_{\vec{l}_{n_2,m_2}} = \underbrace{D_{y,SW}(\theta_2)^T D_{z,SW}(\phi_2)^T (\vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1})}_{\vec{q}_{0,1,2}}$$

folgt

$$q_{0,1,x,1} = s_1 \cdot \cos(\alpha) \cos(\beta) - r_1 \cdot l_{n_1,m_1,x} \quad (4.27)$$

$$q_{0,1,y,1} = s_1 \cdot \sin(\alpha) \cos(\beta) - r_1 \cdot l_{n_1,m_1,y} \quad (4.28)$$

$$q_{0,1,z,1} = s_1 \cdot (-1) \cdot \sin(\beta) - r_1 \cdot l_{n_1,m_1,z} \quad (4.29)$$

1. Scheinwerferverlagerung

$$q_{0,1,x,2} = s_2 \cdot \cos(\alpha) \cos(\beta) - r_2 \cdot l_{n_2,m_2,x} \quad (4.30)$$

$$q_{0,1,y,2} = s_2 \cdot \sin(\alpha) \cos(\beta) - r_2 \cdot l_{n_2,m_2,y} \quad (4.31)$$

$$q_{0,1,z,2} = s_2 \cdot (-1) \cdot \sin(\beta) - r_2 \cdot l_{n_2,m_2,z} \quad (4.32)$$

2. Scheinwerferverlagerung

Durch das Gleichsetzen von Gleichung (4.27) mit Gleichung (4.30) und Gleichung (4.28) mit Gleichung (4.31) sowie von Gleichung (4.29) mit Gleichung (4.32) des Gleichungssystems können die von α und β abhängigen Terme eliminiert werden, Gleichungen (4.33), (4.34) und (4.35). Es entstehen drei Ausdrücke für $\frac{s_1}{s_2}$, wobei mittels der Gleichungen (4.33) und (4.35) sowie der Gleichungen (4.33) und (4.34) zwei Ausdrücke mit den unbekanntnen Entfernungsinformationen r_1 und r_2 gebildet werden, Gleichungen (4.36) und (4.37). Die Entfernungsinformation ist durch die Lösung einer quadratischen Gleichung (4.38) bestimmbar.

Unabhängigkeit von α und β

$$\frac{q_{0,l,x,1} + r_1 \cdot l_{n_1,m_1,x}}{q_{0,l,x,2} + r_2 \cdot l_{n_2,m_2,x}} = \frac{s_1}{s_2} \quad (4.33)$$

$$\frac{q_{0,l,y,1} + r_1 \cdot l_{n_1,m_1,y}}{q_{0,l,y,2} + r_2 \cdot l_{n_2,m_2,y}} = \frac{s_1}{s_2} \quad (4.34)$$

$$\frac{q_{0,l,z,1} + r_1 \cdot l_{n_1,m_1,z}}{q_{0,l,z,2} + r_2 \cdot l_{n_2,m_2,z}} = \frac{s_1}{s_2} \quad (4.35)$$

$$r_1 = \frac{-a_1 - r_2 a_3}{a_2 + r_2 a_4} \quad (4.36)$$

mit

$$\begin{aligned} a_1 &= q_{0,l,z,1} q_{0,l,x,2} - q_{0,l,x,1} q_{0,l,z,2} \\ a_2 &= l_{n_1,m_1,z} q_{0,l,x,2} - l_{n_1,m_1,x} q_{0,l,z,2} \\ a_3 &= l_{n_2,m_2,x} q_{0,l,z,1} - l_{n_2,m_2,z} q_{0,l,x,1} \\ a_4 &= l_{n_1,m_1,z} l_{n_2,m_2,x} - l_{n_2,m_2,z} l_{n_1,m_1,x} \end{aligned}$$

$$r_1 = \frac{-b_1 - r_2 b_3}{b_2 + r_2 b_4} \quad (4.37)$$

mit

$$\begin{aligned} b_1 &= q_{0,l,y,1} q_{0,l,x,2} - q_{0,l,x,1} q_{0,l,y,2} \\ b_2 &= l_{n_1,m_1,y} q_{0,l,x,2} - l_{n_1,m_1,x} q_{0,l,y,2} \\ b_3 &= l_{n_2,m_2,x} q_{0,l,y,1} - l_{n_2,m_2,y} q_{0,l,x,1} \\ b_4 &= l_{n_1,m_1,y} l_{n_2,m_2,x} - l_{n_2,m_2,y} l_{n_1,m_1,x} \end{aligned}$$

quadratischer Ausdruck durch Gleichsetzen von (4.36) und (4.37)

$$\begin{aligned} r_2^2 c_3 + r_2 c_2 + c_1 &= 0 \\ r_{2,1,2} &= \frac{-c_2}{2c_3} \pm \sqrt{\frac{c_2^2}{4c_3^2} - \frac{c_1}{c_3}} \end{aligned} \quad (4.38)$$

mit

$$\begin{aligned} c_1 &= b_1 a_2 - a_1 b_2 \\ c_2 &= b_3 a_2 + b_1 a_4 - b_2 a_3 - a_1 b_4 \\ c_3 &= b_3 a_4 - a_3 b_4 \end{aligned}$$

Durch $r_{2,1,2}$ kann die globale Position des abgebildeten H0V0-Punkts über $\vec{g}_{\text{HDG},2,1,2}$ bestimmt werden, siehe Abschnitt 4.1.2, Gleichung (4.10). Für die Berechnung der Fehlstellungen in horizontaler Richtung α und in vertikaler Richtung β wird $\vec{g}_{\text{HDG},2,1,2} = \vec{p}_{\text{global}}(\alpha, \beta)$ in Gleichung (4.5), Abschnitt 4.1.1, angenommen.

aus

$$\vec{g}_{\text{HDG},21,2} = s_{21,2} \cdot D_{z,\text{SW}}(\phi_2) D_{y,\text{SW}}(\theta_2) D_{z,\text{SW}}(\alpha) D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} + \vec{s}_{0,1}$$

$$\underbrace{D_{y,\text{SW}}^T(\theta_2) D_{z,\text{SW}}^T(\phi_2) (\vec{g}_{\text{HDG},21,2} - \vec{s}_{0,1})}_{\begin{pmatrix} \Gamma_x \\ \Gamma_y \\ \Gamma_z \end{pmatrix}} = \underbrace{s_{21,2} \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha) D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}}}_{\begin{pmatrix} s_{21,2} \cdot \cos(\alpha) \cos(\beta) \\ s_{21,2} \cdot \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ s_{21,2} \cdot (-1) \cdot \sin(\beta) \end{pmatrix}}$$

mit

$$\left\| D_{y,\text{SW}}^T(\theta_2) D_{z,\text{SW}}^T(\phi_2) (\vec{g}_{\text{HDG},21,2} - \vec{s}_{0,1}) \right\| = s_{21,2}$$

folgt

$$\arcsin \left(\frac{-\Gamma_z}{\left\| D_{y,\text{SW}}^T(\theta_2) D_{z,\text{SW}}^T(\phi_2) (\vec{g}_{\text{HDG},21,2} - \vec{s}_{0,1}) \right\|} \right) = \beta_{1,2} \quad (4.39)$$

$$\arcsin \left(\frac{\Gamma_y}{\left\| D_{y,\text{SW}}^T(\theta_2) D_{z,\text{SW}}^T(\phi_2) (\vec{g}_{\text{HDG},21,2} - \vec{s}_{0,1}) \right\| \cos(\beta_{1,2})} \right) = \alpha_{1,2} \quad (4.40)$$

Am Ende entstehen zwei Lösungspaare, wobei eine Lösung ausgewählt wird. Das Auswahlkriterium gründet auf den absoluten Winkelwerten, die eine realistische Fehlstellung des Hauptscheinwerfers beschreiben. Es kann nachgewiesen werden, dass das weitere Lösungspaar immer in der Scheinwerferebene liegt und nicht berücksichtigt werden muss [141]. Im Hinblick auf eine veränderte scheinwerferspezifische Anordnung der Drehmatrizen, Abschnitt 5.3.1, sind im Anhang A weitere Lösungswege gegeben.

4.4 Verifizierung des Berechnungsverfahrens

Die Robustheit des vorgestellten Berechnungsverfahrens nach Abschnitt 4.3.2 soll im Kontext diskreter Kameravektoren, Abschnitt 4.4.2, der Anzahl und der Anordnung der charakteristischen Punkte, Abschnitte 4.4.3 und 4.4.4, sowie der Geometriebeziehungen zwischen Projektionsfläche und Hauptscheinwerfer, Abschnitt 4.4.5, simulativ untersucht werden. Die genutzte Simulationsumgebung, Abschnitt 4.4.1, umfasst die Gestaltung definierter Szenarien, das eigentliche Berechnungsverfahren und eine Auswertung der Berechnungsergebnisse.

4.4.1 Aufbau der Simulationsumgebung

Die Gestaltung der Szenarien ist aus Abschnitt 4.2.3 bekannt. Hierbei sind die Geometriebeziehungen zwischen Scheinwerfer, Projektionsfläche und Kamera durch die

Vektoren \vec{E}_p , $\vec{s}_{0,1}$ und \vec{r}_0 parametrierbar⁹. Die vordefinierten Scheinwerferfehlstellungen werden durch α und β beschrieben. Die notwendigen linear unabhängigen charakteristischen Punkte der Hauptscheinwerfer werden mittels der Winkel ϕ_p und θ_p in die Simulation eingebracht, wobei $p = 2$ linear unabhängige charakteristische Positionen die Mindestanzahl für das Berechnungsverfahren darstellen, Abschnitt 4.3.2.

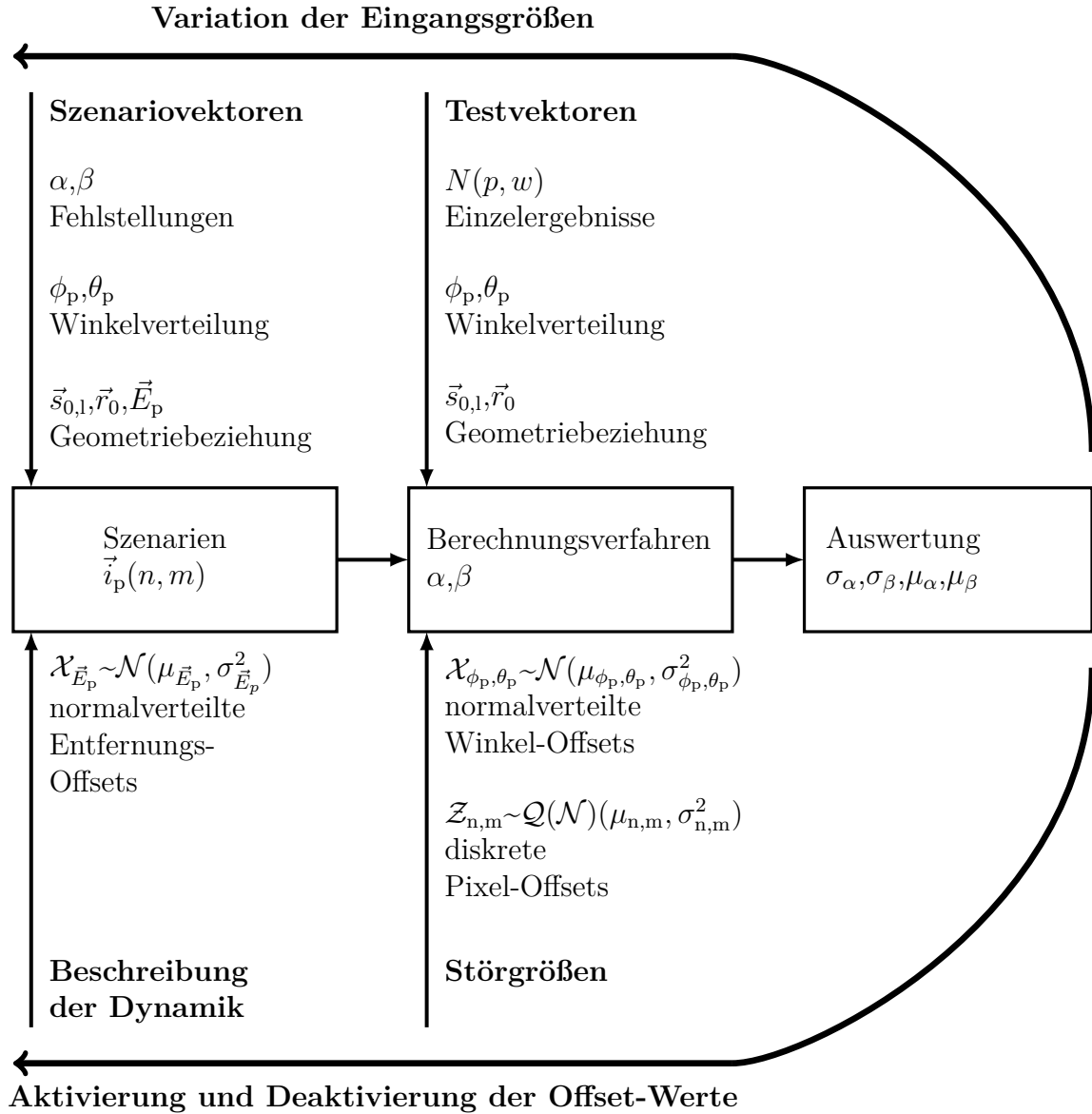


Abbildung 4.5: Darstellung der Simulationsabläufe

Aus den vordefinierten Szenarien¹⁰ $\mathcal{S}_{\text{kont},p}(\mathcal{G}(\vec{E}_p, \vec{s}_{0,1}, \vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p)), \vec{r}_0) = \vec{k}_p$, Gleichung (4.22), werden die entsprechenden Pixelpositionen der cha-

⁹Aus Gründen der einfacheren Darstellung ist nur die Anbauposition des linken Hauptscheinwerfers aufgeführt.

¹⁰Für die Simulation eines Kalibriervorgangs mit p charakteristischen Punkten und einer Wiederholrate w werden $p \cdot w$ Szenarien definiert.

Charakteristischen Punkte $\mathcal{K}^{-1}(\mathcal{S}_{\text{kont,Kugel,p}}(\mathcal{G}(\vec{E}_p, \vec{s}_{0,1}, \vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p)), \vec{r}_0)) = \vec{i}_p(n, m)$, Gleichung (4.23), berechnet. Nachfolgend werden den Orientierungen der HDG diskrete Detektionsrichtungen der Kamera zugeordnet $\mathcal{K}(\mathcal{K}^{-1}(\mathcal{S}_{\text{kont,Kugel,p}}(\mathcal{G}(\vec{E}_p, \vec{s}_{0,1}, \vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p)), \vec{r}_0))) = \vec{k}_{n_p, m_p}$, Gleichung (4.24). Zusätzlich werden die Entfernungsinformationen mit einem normalverteilten Offset-Wert mit den Zufallsvariablen $\mathcal{X}_{\vec{E}_p} \sim \mathcal{N}(\mu_{\vec{E}_p}, \sigma_{\vec{E}_p}^2)$ versehen, wodurch dynamische Vorgänge abgebildet werden können.

Die Pixelpositionen, die Scheinwerfer- und Kameraanbaupositionen sowie die Winkel der charakteristischen Punkte gehen als Testvektoren in das Berechnungsverfahren ein. Jedes Pattern¹¹, bestehend aus p charakteristischen Punkten, generiert $N(p) = \frac{p \cdot (p-1)}{2}$ Einzelergebnisse. Die Patterns können bis zur Bestimmung des Endergebnisses mit der Wiederholrate w mehrmals angewendet werden, wodurch aus $N(p, w) = \frac{w \cdot p \cdot (p-1)}{2}$ Ergebnissen das Kalibrierergebnis berechnet wird. Ein Pattern aus p charakteristischen Punkten, das w -mal wiederholt wird, beschreibt folglich einen Kalibriervorgang. Ferner besteht die Möglichkeit, den toleranzbehafteten Trackingprozess der Kamera mittels diskreter Zufallsvariablen¹² $\mathcal{Z}_{n,m} \sim \mathcal{Q}(\mathcal{N})(\mu_{n,m}, \sigma_{n,m}^2)$ und die Ungenauigkeit der Scheinwerferstellmotorik über normalverteilte Zufallsvariablen $\mathcal{X}_{\phi_p, \theta_p} \sim \mathcal{N}(\mu_{\phi_p, \theta_p}, \sigma_{\phi_p, \theta_p}^2)$ beispielhaft zu beschreiben und somit die Ergebnisse gezielt zu verrauschen.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse macht einen Indikator notwendig, der die unterschiedlichen Kalibrierausführungen bewertet. Folglich werden Kalibriertoleranzen bestimmt, um die simulierten Resultate mit den Angaben aus der Literatur, Abschnitt 2.4, zu vergleichen. Hierfür werden in der Simulationsumgebung für die Kalibrierergebnisse verschiedener Szenarien Standardabweichungen σ_α und σ_β berechnet. Dabei wird jeder Kalibriervorgang 100-mal wiederholt, um eine verlässliche statistische Aussage treffen zu können. Zusätzlich wird der Mittelwert über die 100 Kalibrierergebnisse gebildet, um die Korrektheit der Kalibrierung zu gewährleisten. Der Aufbau der Simulationsumgebung ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

4.4.2 Einfluss des Kameradiskretisierungsgrads

Die Auflösung des zur Verfügung stehenden Kamerasystems ist mit $0,053^\circ$ festgelegt, Anhang D.1, Tabelle D.1. Die nachfolgende Simulation definiert Szenarien mit einem Abstand von $x_p = 10$ m zwischen der Projektionsfläche \vec{E}_p und dem Ursprung des globalen Koordinatensystems¹³. Der Abstand wird mit einem normalverteilten Offset-Wert versehen und weist eine Standardabweichung von $\sigma_{\vec{E}_p} = 1$ m und einen Mittelwert von $\mu_{\vec{E}_p} = 0$ m auf. Die Anzahl der charakteristischen Punkte für das Pattern wird mit $p \in \{2, \dots, 25\}$ angegeben. Die Winkelverteilungen der Patterns umfassen im Maximum 25 verschiedene Punkte, die in einer 5×5 Matrix im Winkelraum angeordnet sind, Anhang B.1.1, Tabelle B.1 und Abbildung B.1.

¹¹Ein Pattern ist eine Folge von p unterschiedlichen Verfahrenswinkeln für den Scheinwerfer.

¹²Die Grundlage für die diskreten Zufallsvariablen ist die Dichtefunktion einer Normalverteilung, die quantisiert wird.

¹³Der Abstand zwischen Ursprung und Scheinwerfer beträgt ungefähr 3 m.

Die horizontalen Winkelabstände der Punkte werden mit $\Delta\phi = 2^\circ$ angenommen, die vertikalen Winkelabstände sind zu $\Delta\theta = 1,5^\circ$ gewählt, was zu einem maximalen Winkelbereich von $\Delta\phi_{\max} = 8^\circ$ und $\Delta\theta_{\max} = 6^\circ$ führt. Die Anwendbarkeit des Kalibrierverfahrens ist für ein Scheinwerfersystem, in dem eine Leuchtweitenregulierung mit $\Delta\theta_{\max,ALWR} = 6^\circ$ und ein dynamisches Kurvenlicht mit $\Delta\theta_{\max,DKL} = 22^\circ$ verfügbar sind, umsetzbar¹⁴. Die Wiederholraten des Kalibriervorgangs werden mit $w \in \{1, 2, 4, 8, 16\}$ variiert.

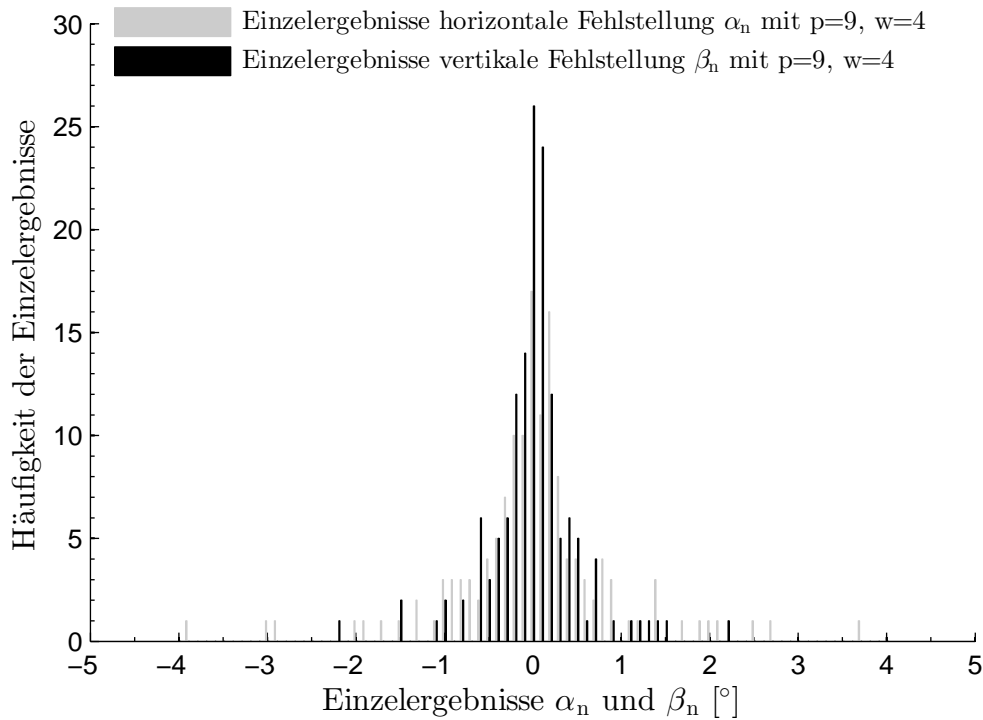


Abbildung 4.6: Einzelergebnisse eines Kalibrierablaufs mit je $N(9,4) = 144$ Werten für die horizontalen und die vertikalen Fehlstellungen (α_n, β_n)

Die Bestimmung der horizontalen und der vertikalen Fehlstellung des Hauptscheinwerfers mit $\alpha = 0^\circ$ und $\beta = 0^\circ$ wird beispielhaft mit den genannten Simulationsparametern ausgeführt. Der definierte Kalibriervorgang nutzt $p = 9$ charakteristische Punkte und eine Wiederholrate von $w = 4$. Die in Abbildung 4.6 dargestellten Histogramme zeigen die Verteilung der $N(9,4) = 144$ Einzelergebnisse für die horizontale und die vertikale Scheinwerferfehlstellung (α_n, β_n). Aus den Einzelergebnissen wird das Kalibrierungsergebnis mittels Median-Bestimmung zu $\alpha_{N(9,4),\text{Med}} = -0,0066^\circ$ und $\beta_{N(9,4),\text{Med}} = -0,0043^\circ$ ermittelt. Eine Auswertung über den Mittelwert zeigt mit $\alpha_{N(9,4),\mu} = -0,0395^\circ$ und $\beta_{N(9,4),\mu} = -0,0221^\circ$ eine größere Abweichung vom geforderten Zielergebnis. Durch den normalverteilten Offset-Wert der Entfernung der einzelnen charakteristischen Punkte liefert das mehrmalige Anwenden der Kalibrierung unterschiedliche Ergebnisse, wodurch die Median-Bestimmung mit einer Standardabweichung von $\sigma_{\alpha,N(9,4),100,\text{Med}} = 0,0751^\circ$ und $\sigma_{\beta,N(9,4),100,\text{Med}} = 0,0426^\circ$ im Ver-

¹⁴Porsche Dynamic Light System +, LED-Scheinwerfer, Porsche 911 (991).

gleich zur Mittelwertsbestimmung mit $\sigma_{\alpha, N(9,4), 100, \mu} = 0,0838^\circ$ und $\sigma_{\beta, N(9,4), 100, \mu} = 0,0476^\circ$ bessere Resultate zeigt. Es kann auf Basis einer erhöhten Anzahl an Einzelergebnissen nicht zwangsläufig auf eine Normalverteilung geschlossen werden, was die Maßnahme rechtfertigt, einen Median als robusten Schätzer zu verwenden.

Die Güte der Kalibrierergebnisse soll nachfolgend auf Basis der Standardabweichung $\sigma_{\alpha, N(p,w), 100, \text{Med}}$ und $\sigma_{\beta, N(p,w), 100, \text{Med}}$ untersucht werden. Hierzu wird das Kalibrierverfahren für konstante p - und w -Werte entsprechend der vorangegangenen Untersuchung 100-mal wiederholt. Zur Variation der Einzelergebnisse $N(w, p)$ werden p und w entsprechend den vorangegangenen Ausführungen verändert, was einer Variation des Kalibriervorgangs entspricht¹⁵.

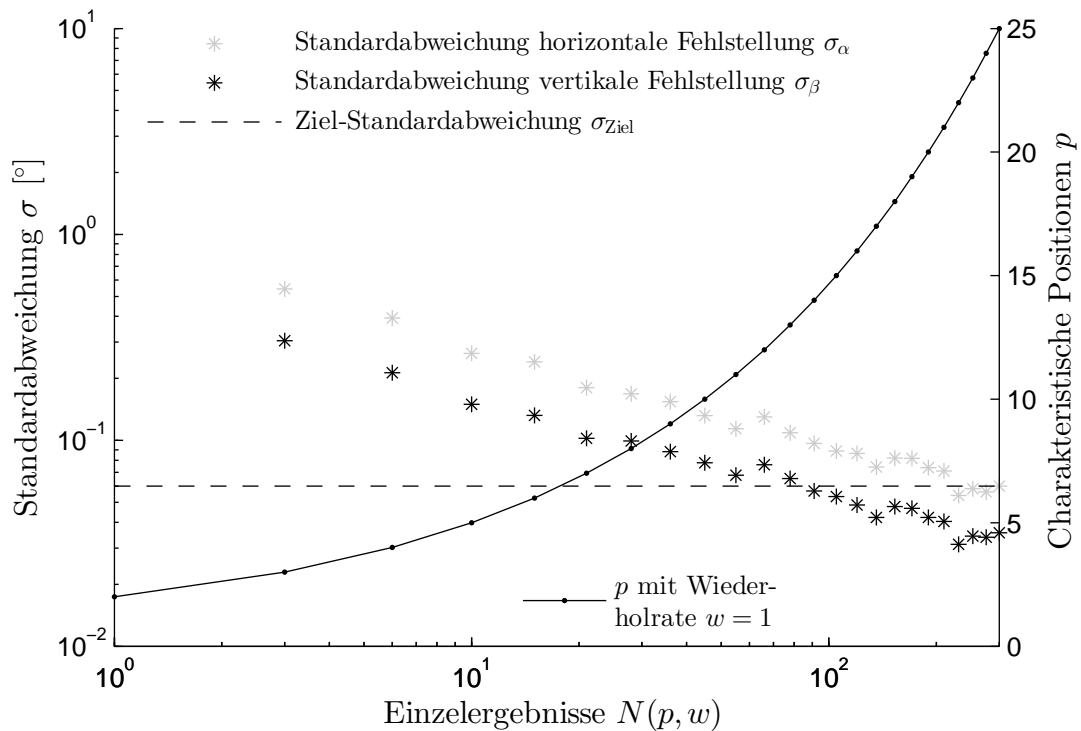


Abbildung 4.7: Abhängigkeit der Standardabweichungen der horizontalen und vertikalen Fehlstellungen unter dem Einfluss des Diskretisierungsgrads der Kamera für $N(p, 1)$ Einzelergebnisse

Die Simulationsergebnisse, Abbildung 4.7, zeigen, dass das Kalibrierverfahren unter Einfluss der Kameraauflösung für die horizontale Fehlstellung α eine Mindestanzahl von 210 Einzelergebnissen benötigt, um eine Ziel-Standardabweichung¹⁶ von $0,06^\circ$ zu erreichen. Für die vertikale Fehlstellung β ist hingegen lediglich eine Anzahl von 91 Ergebnissen notwendig.

¹⁵Die Reihenfolge der charakteristischen Punkte bleibt bestehen. Beispielsweise werden für $p = 5$ die ersten 5, für $p = 17$ die ersten 17 charakteristischen Punkte der Tabelle B.1 in Anhang B.1.1 verwendet.

¹⁶Die Standardabweichung entspricht einer Toleranz von $\pm 0,2\%$, unter der Annahme, dass ungefähr $95,4\%$ der Messwerte innerhalb der angegebenen Toleranz liegen ($2 \cdot \sigma = 0,1146^\circ$). Angaben für die Toleranz einer Scheinwerfereinstellung, siehe Abschnitt 2.4.1.

Für die Bestimmung beider Fehlstellungen ist folglich ein Kalibriervorgang mit 21 charakteristischen Punkten bei einer Wiederholrate von $w = 1$ ausreichend, $N(21, 1) = 210$. Eine Erhöhung der Wiederholrate auf $w = 4$ bietet die Möglichkeit, die Anzahl der charakteristischen Punkte auf 10 zu reduzieren, siehe dazu Abbildung 4.8. Die Anzahl der Einzelergebnisse nimmt in diesem Fall mit $N(10, 4) = 180$ einen geringeren Wert an. Weitere Simulationen zeigen für $N(5, 16) = 240$, $N(7, 8) = 168$ und $N(15, 2) = 210$ die Anwendbarkeit der Kalibrierung. Folglich kann mit dem Kalibrierverfahren die Ziel-Standardabweichung unter dem Einfluss des Kameradiskretisierungsgrads mit einer Anzahl zwischen 168 und 240 Einzelergebnissen erreicht werden.

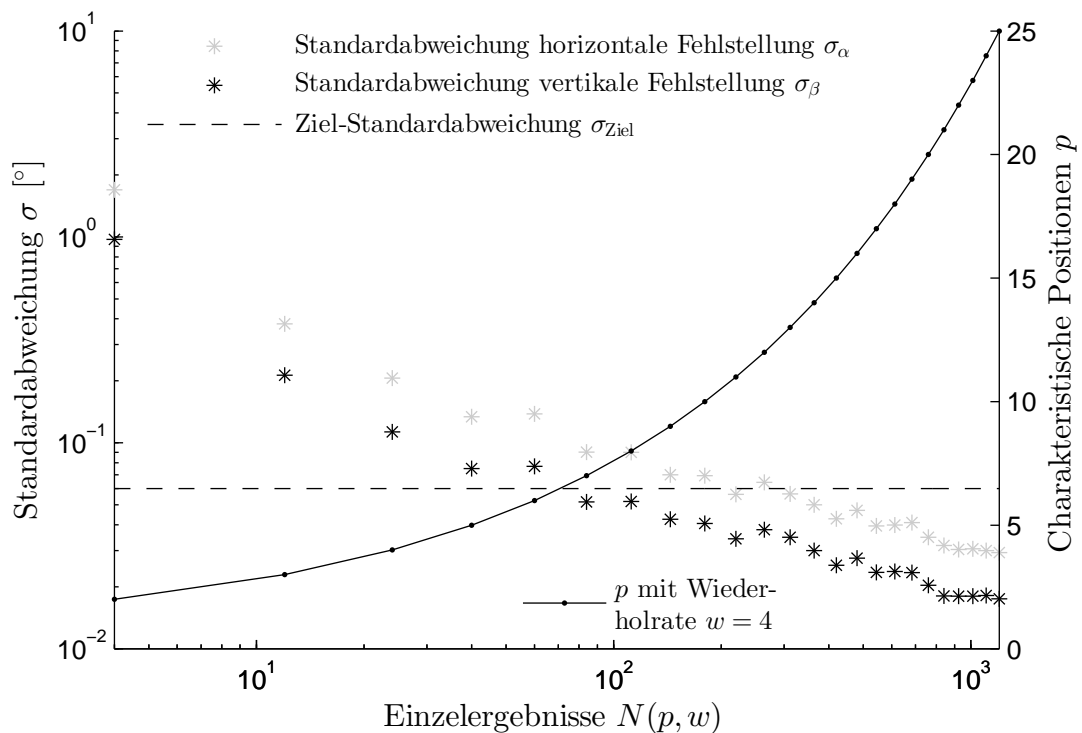


Abbildung 4.8: Abhängigkeit der Standardabweichungen der horizontalen und vertikalen Fehlstellung unter dem Einfluss des Diskretisierungsgrads der Kamera für $N(p, 4)$ Einzelergebnisse

Der geringere Einfluss der Kameraauflösung auf die vertikale Fehlstellung ist auf die ungenaue Bestimmung der Entfernungsinformation, Abschnitt 4.3.2, Gleichung (4.38), zurückzuführen, die einen stärkeren Einfluss auf die horizontale Fehlstellung hat.

4.4.3 Einfluss der Anzahl der charakteristischen Punkte

Die Anzahl der Einzelergebnisse des Kalibriervorgangs ist das Resultat der Anzahl der charakteristischen Punkte und der Wiederholrate. Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.4.2 deuten im Hinblick auf das Erreichen einer Ziel-Standardabweichung darauf hin, dass die Anzahl der Einzelergebnisse der entscheidende Faktor ist, sofern von der definierten Anordnung der 25 charakteristischen Punkte ausgegangen wird.

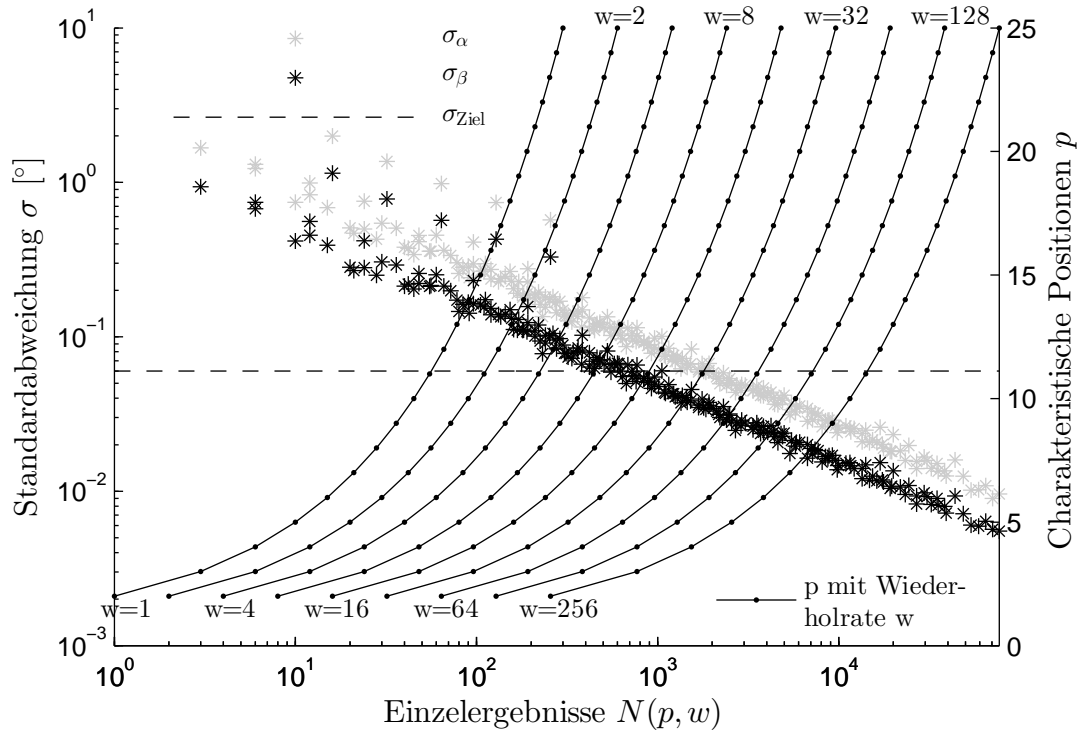


Abbildung 4.9: Abhängigkeit der Standardabweichungen der horizontalen und vertikalen Fehlstellungen unter dem Einfluss des Diskretisierungsgrads der Kamera, der Toleranzen der Stellmotorik und der Toleranzen des Trackingprozesses für $N(p, w)$ Einzelergebnisse

In der nachfolgenden Simulation wird mit den Geometriebeziehungen zwischen Projektionsfläche, Scheinwerfer und Kamera wie in Abschnitt 4.4.2 verfahren. Zusätzlich werden die Verfahrenswinkel ϕ_p und θ_p mit einem normalverteilten Offset-Wert, der eine Standardabweichung¹⁷ von $\sigma_{\phi_p, \theta_p} = 0,033^\circ$ und einen Mittelwert von $\mu_{\phi_p, \theta_p} = 0^\circ$ besitzt, gezielt verrauscht. Ebenso werden die berechneten Pixelpositionen $\vec{i}_p(n, m)$ variiert. Hierbei wird angenommen, dass 99,7 % des Trackingprozesses innerhalb von drei Pixeln liegen. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der diskreten Zufallsvariablen wird aus der quantisierten Dichtefunktion einer Normalverteilung mit $\mu_{n,m} = 0$ und $\sigma_{n,m} = 0,5$ gebildet. Die Störeinflüsse für das Berechnungsverfahren umfassen neben dem in Abschnitt 4.4.2 thematisierten Kameradiskretisierungsgrad zusätzlich

¹⁷Die angenommene Standardabweichung entspricht einer Toleranz von $\pm 0,2\%$ für 99,7 % der Messwerte. Die Toleranz wird von der manuellen Scheinwerfereinstellung abgeleitet.

angenommene Toleranzen hinsichtlich der Verfahrengenauigkeit der Stellmotorik und der Güte des Trackingprozesses. Die Anzahl der charakteristischen Positionen ist mit $p \in \{2, \dots, 25\}$ angegeben, die Wiederholrate wird zu $w \in \{1, 2, 4, 8, 16, 128, 256\}$ angenommen.

Die Simulationsergebnisse, Abbildung 4.9, erhärten die Aussagen aus Abschnitt 4.4.2, wonach die Standardabweichungen für die vertikale Fehlstellung im Vergleich zu den Standardabweichungen der horizontalen Fehlstellung deutlich geringer sind. Zusätzlich wird die These bestätigt, dass die Anzahl der Einzelergebnisse, ungeachtet der Anzahl der vorgegebenen charakteristischen Punkte, einen entscheidenden Einfluss auf die Toleranz des Gesamtsystems hat. Entsprechend kann unter den angenommenen Toleranzen für die Verfahrenswinkel und den Trackingprozess bei einer Mindestanzahl von ungefähr $N(p, w) = 1.500$ Einzelergebnissen unter Berücksichtigung der vorgegebenen Standardabweichung von $0,06^\circ$ auf eine Durchführbarkeit des Kalibrierverfahrens geschlossen werden.

Mit Fokus auf eine Umsetzbarkeit des aktiven Triangulationsverfahrens zur Kalibrierung der Hauptscheinwerfer ist die Anzahl der charakteristischen Punkte durch die Wiederholrate kompensierbar und das Kalibrierverfahren bei Scheinwerfersystemen mit weniger charakteristischen Merkmalen ebenso flexibel einsetzbar.

4.4.4 Einfluss der Anordnung der charakteristischen Punkte

Hinsichtlich der Anwendung des Kalibrierverfahrens bei unterschiedlichen Scheinwerfersystemen ist neben der Anzahl der charakteristischen Punkte ebenso deren Anordnung relativ zueinander von Bedeutung. Die in Abschnitt 4.4.2 eingeführten Winkelverteilungen der Patterns umfassen im Maximum 25 verschiedene Punkte, die in einer 5×5 Matrix im Winkelraum angeordnet sind. Die äquidistanten Winkelabstände in horizontaler ($\Delta\phi = 2^\circ$) und in vertikaler ($\Delta\theta = 1,5^\circ$) Richtung werden in der nachfolgenden Simulation mit einem konstanten Winkelfaktor f verändert, Gleichungen (4.41) und (4.42). Die Szenariengestaltung wird Abschnitt 4.4.3 entnommen.

$$\phi_p(f) = \phi_p \cdot f \quad (4.41)$$

$$\theta_p(f) = \theta_p \cdot f \quad (4.42)$$

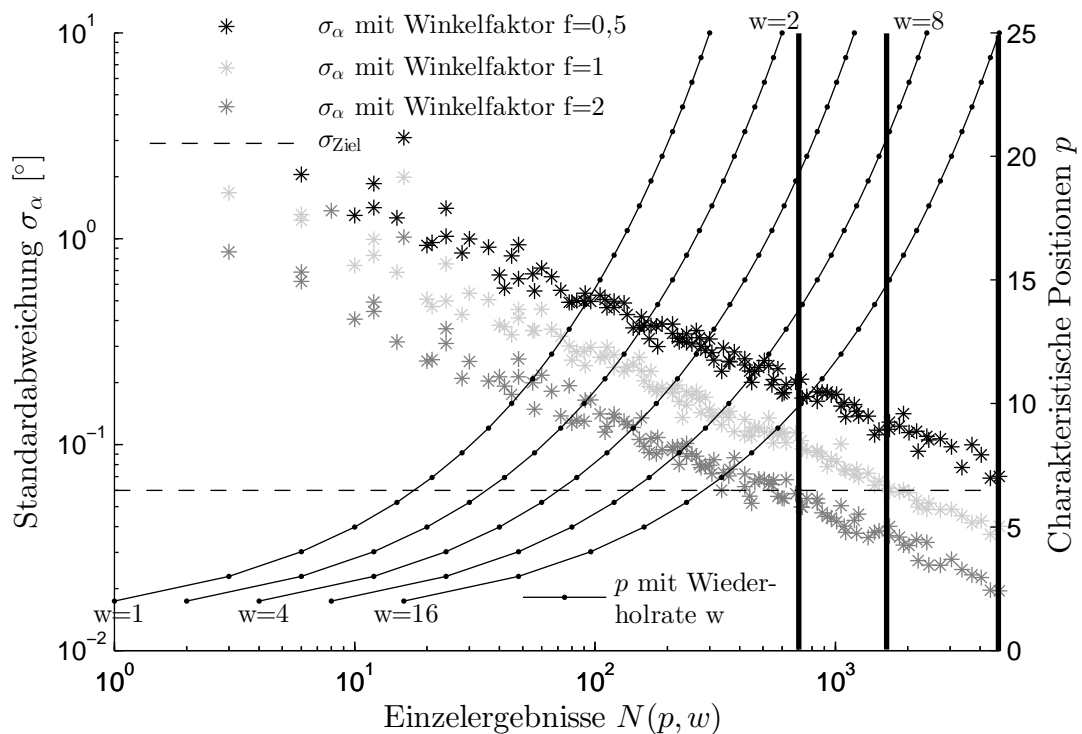


Abbildung 4.10: Abhängigkeit der Standardabweichungen der horizontalen Fehlstellungen unter dem Einfluss des Winkelfaktors ($f = 0,5$, $f = 1$ und $f = 2$), des Diskretisierungsgrads der Kamera, der Toleranzen der Stellmotorik und der Toleranzen des Trackingprozesses für $N(p, w)$ Einzelergebnisse

Die Ergebnisse aus Abbildung 4.10 stellen lediglich die Standardabweichungen der horizontalen Fehlstellungen dar, da aus den vorherigen Simulationen eine Adaption der Anzahl der Einzelergebnisse $N(p, w)$ auf deren Basis erfolgt. Ersichtlich ist eine

Verringerung auf $N(p, w) = 700$ Ergebnisse verbunden mit einem höheren Winkel­faktor $f = 2$, um die Ziel-Standardabweichung zu erreichen. Unter der Annahme eines niedrigeren Winkel­faktors $f = 0,5$ muss die Anzahl der Einzelergebnisse auf $N(p, w) = 5.000$ gesteigert werden.

Die notwendige Menge der Einzelergebnisse $N(p, w)$ ist durch den Einfluss der Winkelabstände parametrierbar, was im Kontext des Speicherbedarfs eines Steuergeräts in einer Serienumsetzung von Bedeutung ist.

4.4.5 Einfluss der Detektionsdistanz

Die in Abschnitt 4.4.1 getroffene Annahme der normalverteilten variierten Entfernung zwischen Scheinwerfer und Projektionsfläche wird genutzt, um die Durchführbarkeit des Kalibriervorgangs unter dynamischen Bedingungen zu zeigen. Weiterführend soll der Einfluss einer statischen Kalibrierung auf das Berechnungsverfahren untersucht werden.

Der Kalibrierablauf wird lediglich dem Diskretisierungsfehler der Kamera unterzogen, vergleiche hierzu Abschnitt 4.4.2. Das zu untersuchende Pattern umfasst $p = 15$ charakteristische Punkte entsprechend den vorbekannten Winkelverteilungen und nutzt eine Wiederholrate von $w = 16$. Untersucht wird in einem ersten Schritt die Entwicklung der Kalibrierergebnisse für die horizontale und die vertikale Fehlstellung über eine Kalibrierentfernung¹⁸ von 6 m bis 17,5 m, wobei der Abstand zwischen den Entfernungen 0,1 m ist.

Die Kalibrierergebnisse zeigen eine distanzbedingte Schwankung sowohl für die horizontale als auch für die vertikale Fehlstellung, Abbildung 4.11. Die Standardabweichungen der Ergebnisse über alle Distanzen nehmen mit $\sigma_{\alpha, N(15,16), \text{statisch}} = 0,1134^\circ$ und $\sigma_{\beta, N(15,16), \text{statisch}} = 0,0666^\circ$ im Vergleich zum dynamischen Fall, Abschnitt 4.4.2, mit $\sigma_{\alpha, N(15,16), \text{dynamisch}} = 0,024^\circ$ und $\sigma_{\beta, N(15,16), \text{dynamisch}} = 0,015^\circ$ größere Werte an.¹⁹ Eine Wiederholrate mit $w = 16$ führt unter den statischen Bedingungen zu den gleichen Ergebnissen wie eine Wiederholrate mit $w = 1$. Dieser Umstand liegt darin begründet, dass lediglich der Diskretisierungsfehler der Kamera berücksichtigt wird und von weiteren Einflüssen abgesehen wird. Alle Einzelergebnisse sind in diesem Fall identisch. Für den dynamischen Fall werden variierte Einzelergebnisse betrachtet, was eine verringerte Standardabweichung zur Folge hat. Für das aktive Triangulationsverfahren zur Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung muss dieser systembedingte Einfluss berücksichtigt werden.

¹⁸Die Kalibrierentfernung beschreibt den Abstand zwischen Projektionsfläche und dem Ursprung des globalen Koordinatensystems, vergleiche Abschnitt 4.4.2.

¹⁹Die Bestimmung der Standardabweichungen geht im dynamischen Fall auf 100 einzelne Kalibrierergebnisse zurück. Bei der statischen Untersuchung werden 116 Ergebnisse berücksichtigt, wodurch die Vergleichbarkeit gewahrt bleibt. Der Informationsgehalt ist bei der dynamischen Beurteilung höher einzuschätzen, da durch die Wiederholrate keine Wiederholung der Ergebnisse möglich ist, bei der statischen Beurteilung ist dies jedoch der Fall. Genauer ist demnach ein Vergleich mit $\sigma_{\alpha, N(15,1), \text{dynamisch}} = 0,0881^\circ$ und $\sigma_{\beta, N(15,1), \text{dynamisch}} = 0,0522^\circ$. Die Aussage bleibt dennoch bestehen.

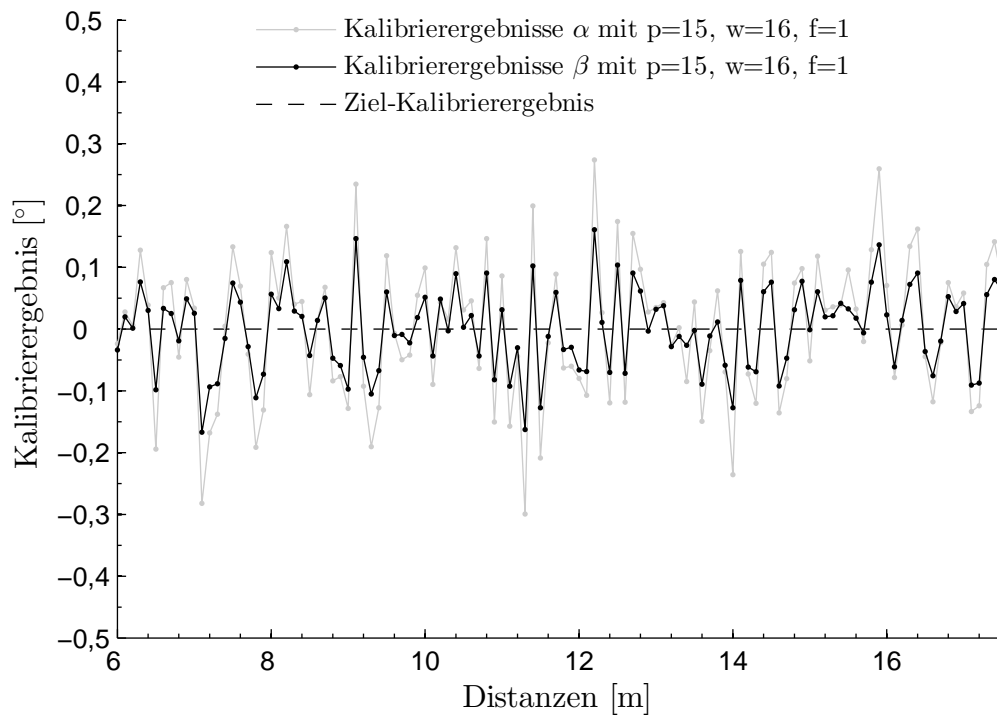
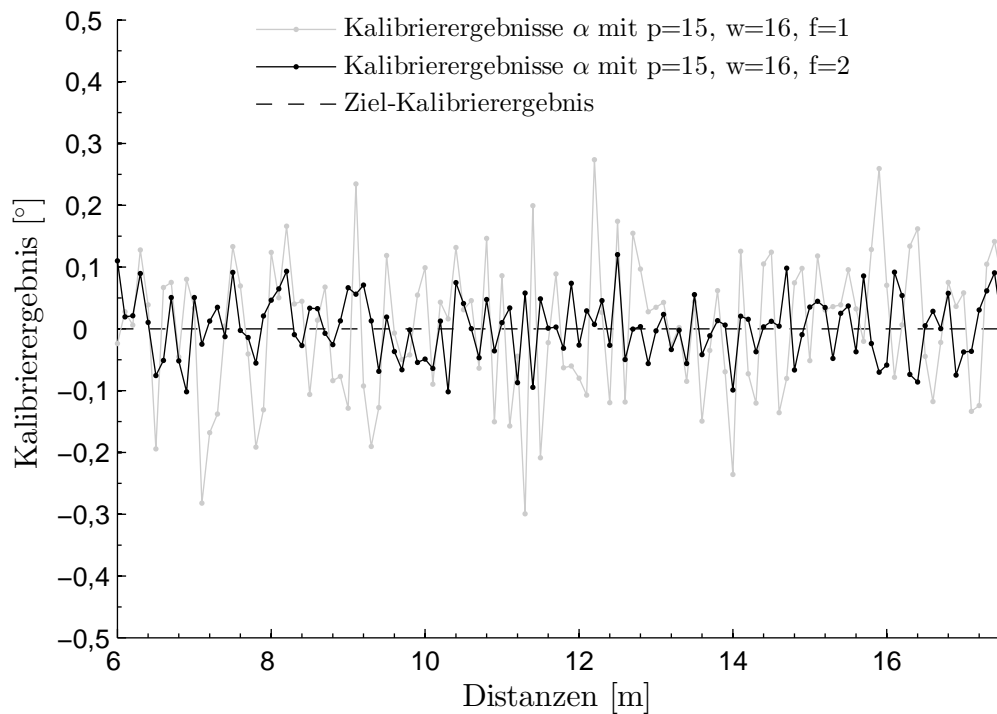


Abbildung 4.11: Kalibrierergebnisse in Abhängigkeit der Distanzen

Abbildung 4.12: Vergleich der Kalibrierergebnisse der horizontalen Fehlstellungen in Abhängigkeit der Distanzen und des Winkelfaktors ($f = 1$ und $f = 2$)

In Abschnitt 4.4.4 wird der Winkelfaktor eingeführt, wodurch die Winkelweite zwischen den charakteristischen Punkten variiert werden kann. Bekannt ist, dass durch die Verringerung des Winkelfaktors auf Basis der angenommenen Toleranzen eine Erhöhung der Anzahl der Einzelergebnisse notwendig ist. Zielführend ist hierbei eine Erhöhung des Winkelfaktors zur Minimierung der Anzahl der Einzelergebnisse. Folglich wird in einem zweiten Schritt der Zusammenhang zwischen Detektionsdistanz und Kalibrierergebnis im Kontext einer Winkelfaktoränderung betrachtet. Die Ergebnisse bestätigen die Annahmen aus Abschnitt 4.4.4, wonach eine Erhöhung des Winkelfaktors eine Verringerung der Systemstandardabweichung zur Folge hat, Abbildung 4.12. Hingegen führt ein verringerter Winkelfaktor zu einer Erhöhung der Standardabweichung.

Unter dem Gesichtspunkt der Winkelveränderung wird in einem dritten Verfahren die geometrische Orientierung der charakteristischen Punkte durch einen gleichverteilten Offset-Wert variiert. Die Winkel-Offsets x_ϕ und x_θ nehmen diskrete Werte zwischen $-0,05^\circ$ und $+0,05^\circ$ an, wobei die Schrittweite $0,0125^\circ$ beträgt, Gleichungen (4.43) und (4.44). Für das menschliche Auge sind diese Variationen bei einem Scheinwerfersystem mit Stellmotorik nicht zu sehen. Abschließend wird die Variation der charakteristischen Positionen in Kombination mit den Winkelfaktoren angewendet, Abbildung 4.13.

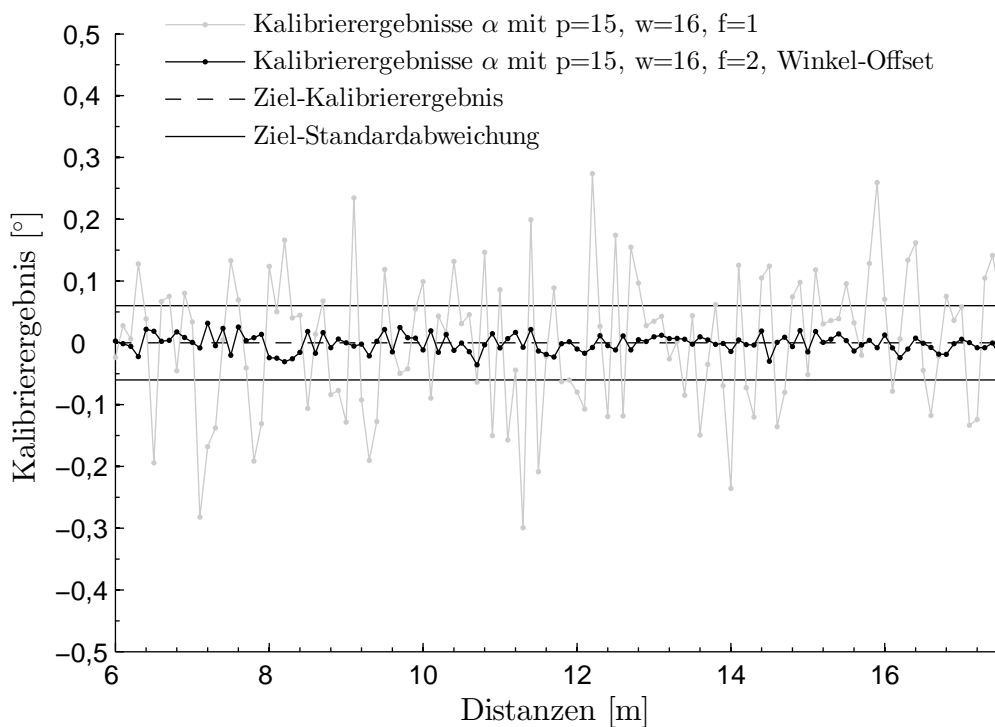
$$\begin{aligned} \phi_p(x) &= \phi_p + nx_\phi \\ \text{mit } \mathcal{P}(nx_\phi) &= \frac{1}{9} \quad \forall n \in \{-4, \dots, 4\} \text{ und } x_\phi = 0,0125^\circ \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} \theta_p(x) &= \theta_p + nx_\theta \\ \text{mit } \mathcal{P}(nx_\theta) &= \frac{1}{9} \quad \forall n \in \{-4, \dots, 4\} \text{ und } x_\theta = 0,0125^\circ \end{aligned} \quad (4.44)$$

Die Ergebnisse aus Tabelle 4.1 zeigen, dass durch die gleichverteilten Winkel-Offsets oder einen Winkelfaktor mit $f \geq 1$ die Möglichkeit besteht, der systembedingten Schwachstelle des Kalibrierverfahrens entgegenzuwirken und vergleichbare Standardabweichungen, wie sie bei der Durchführung der Kalibrierung unter dynamischen Situationen vorliegen, annähernd zu erreichen.

Tabelle 4.1: Systemstandardabweichungen im Vergleich

Szenarien $N(15, 16)$	horizontale Fehlstellung α		vertikale Fehlstellung β	
	Standard- abweichung σ_α	Mittelwert μ_α	Standard- abweichung σ_β	Mittelwert μ_β
$f = 1$	0,1134°	0,0020°	0,0666°	0,0000°
$f = 2$	0,0513°	0,0026°	0,0326°	0,0015°
$f = 0,5$	0,2695°	-0,0260°	0,1601°	-0,0149°
$f = 1$, Winkel-Offset	0,0308°	0,0010°	0,0180°	0,0012°
$f = 2$, Winkel-Offset	0,0140°	-0,0010°	0,0082°	-0,0011°
$f = 1$, $N(15, 1)$, Winkel-Offset	0,0981°	-0,0113°	0,0588°	-0,0071°
$f = 2$, $N(15, 1)$, Winkel-Offset	0,0469°	0,0002°	0,0289°	0,0013°
$f = 1$, Variation Distanz	0,0240°	-0,0014°	0,0150°	-0,0004°
$f = 1$, $N(15, 1)$, Variation Distanz	0,0881°	-0,0125°	0,0522°	-0,0034°

Abbildung 4.13: Vergleich der Kalibrierergebnisse der horizontalen Fehlstellungen in Abhängigkeit der Distanzen, des Winkelfaktors ($f = 1$ und $f = 2$) und der Winkel-Offsets

5 Systemablauf

In diesem Kapitel wird der Systemablauf der automatisierten Scheinwerfereinstellung dargestellt, Abbildung 5.1. Aus dem Rohbild der Kamera werden über einen adaptiven Bildverarbeitungsalgorithmus, Abschnitt 5.1, die H0V0-Punkte der Scheinwerferlichtverteilung bestimmt. Die Systemsteuerung, Abschnitt 5.2, koordiniert die Zuordnung zwischen der geometrischen Verlagerung der HDG und der Detektionsrichtung der Kamera. Auf Basis der Kamera- und der Scheinwerferinformationen werden die Fehlstellungen berechnet und die Ausrichtung der Lichtverteilung adaptiert, Abschnitt 5.3.

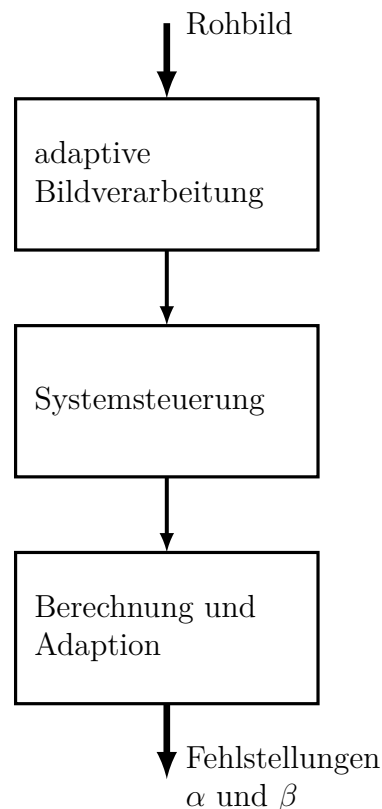


Abbildung 5.1: Darstellung des Systemablaufs

5.1 Adaptiver Bildverarbeitungsalgorithmus

Die Erkennung der H0V0-Punkte im Verkehrsraum unterliegt den geometrischen Einflussfaktoren einer variablen Distanz zwischen Scheinwerfer und abgebildeter

HDG sowie möglichen Schrägstellungen der Projektionsfläche vor dem Fahrzeug. Daraus resultieren bereits bei ein und derselben Projektionsfläche unter Laborbedingungen lichttechnische Unterschiede. Im Verkehrsraum geht durch die Vielfalt möglicher Abbildungsflächen mit unterschiedlichem Reflexionsgrad und durch die wechselnden Umfeldleuchtdichten in der jeweiligen Szene die Übersicht verloren. Die aus der Literatur bekannten Bildverarbeitungsansätze zur Erkennung lichtverteilungsspezifischer Charakteristika nutzen überwachte Verfahren, Abschnitt 3.1.2, die auf Basis der notwendigen Trainingsdaten nur einen Bruchteil der geschilderten Situationen abdecken.

Für die automatisierte Scheinwerfereinstellung wird ein adaptiver Bildverarbeitungsalgorithmus umgesetzt, der eine Segmentierung und eine Bildvorverarbeitung, Abschnitt 5.1.1, sowie eine Merkmalsextraktion, Abschnitt 5.1.2, und eine Klassifizierung, Abschnitt 5.2.1, umfasst, Abbildung 5.2. Die Zielsetzung besteht darin, eine reproduzierbare Erkennung der H0V0-Punkte aus dem Rohbild der Kamera zu ermöglichen.

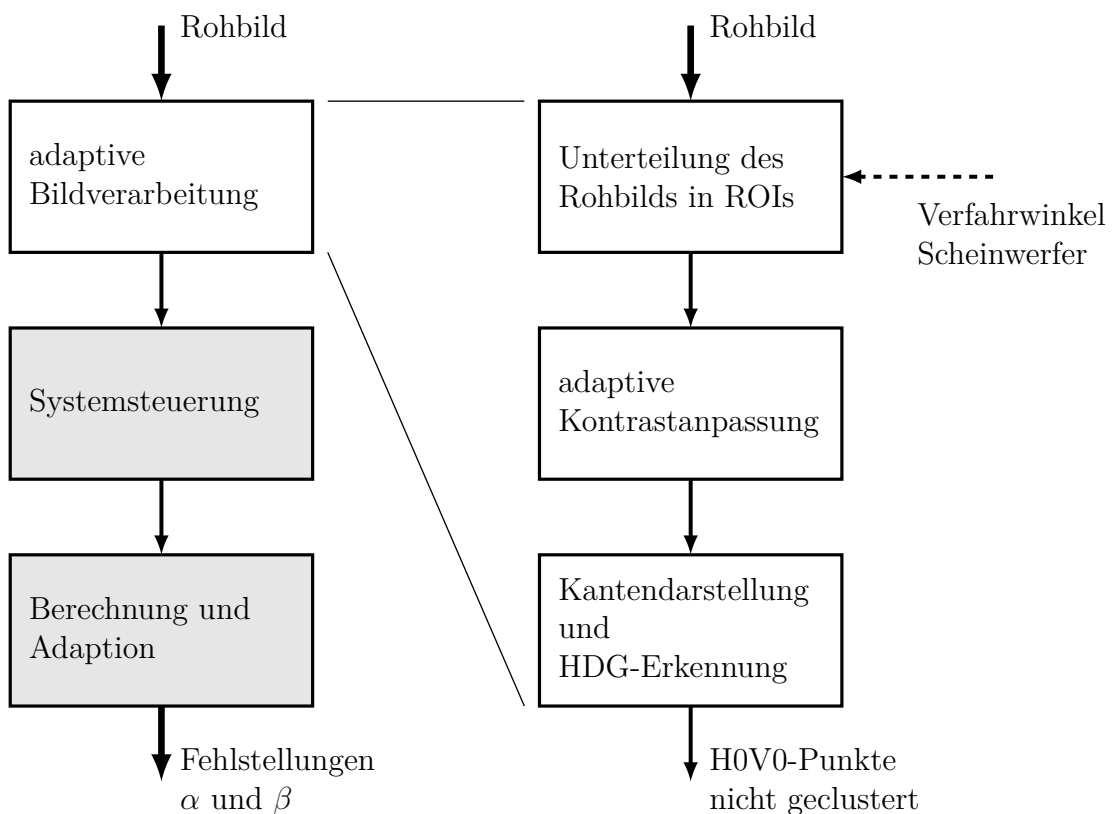


Abbildung 5.2: Ablauf der adaptiven Bildverarbeitung

5.1.1 Segmentierung und Bildvorverarbeitung

Die Segmentierung und die Bildvorverarbeitung bilden die grundlegenden Operationen der adaptiven Bildvorverarbeitung.

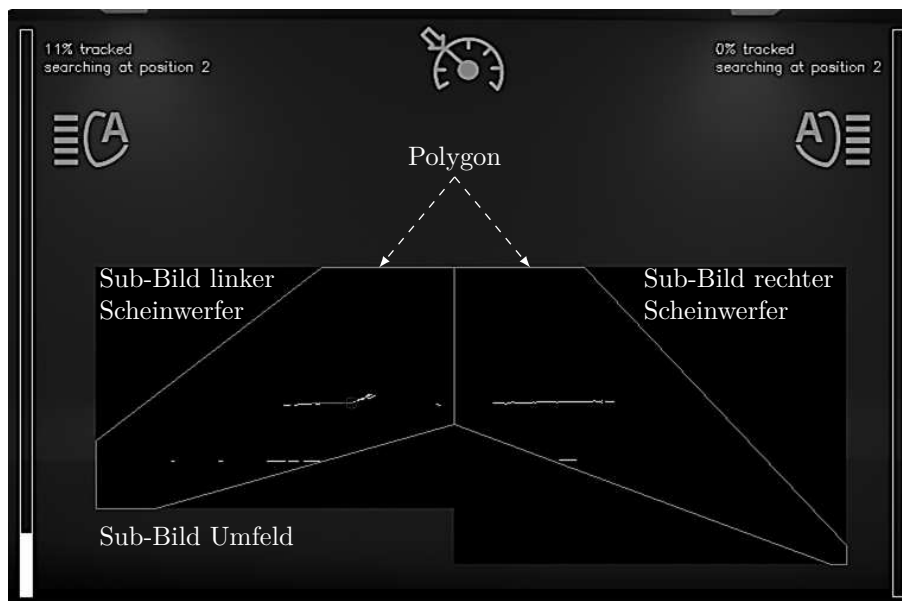


Abbildung 5.3: Darstellung der Segmentierung des Kamerabilds

Segmentierung: Die Parallaxe zwischen den Scheinwerfern und der Kamera, Abschnitt 4.2.2, macht es über eine Segmentierung des Kamerabilds in drei Bereiche (Region of Interest, ROI) möglich, die Abbildung beider HDGs im Verkehrsraum zu trennen. Jedoch müssen die maximale Entfernung, in der ein HOV0-Punkt erkannt werden soll, und die maximal zu detektierende horizontale Fehlstellung in Betracht gezogen werden. Eine höhere Detektionsentfernung geht auf Kosten einer geringeren maximal bestimmbaren horizontalen Fehlstellung und umgekehrt. Als zweckdienlich haben sich Detektionsdistanzen¹ im Bereich zwischen 6 m bis 16 m und ein Vorhalt für eine maximale Fehlstellung zwischen $-1,5^\circ$ und $+1,5^\circ$ erwiesen². Durch die Segmentierung besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Bildverarbeitungszeit und etwaige Fehldetektionen zu verringern. Von den drei Sub-Bereichen werden lediglich die beiden Bilder untersucht, in denen eine HDG unter den angenommenen Bedingungen abbildbar ist. Die Sub-Bilder besitzen für die Bildvorverarbeitung eine rechteckige Form, um durch die angewandten Filteroperationen in den Randbereichen keine Störeinflüsse zu erzeugen. Für die folgende Kantenerkennung, Abschnitt 5.1.2, wird das rechteckige Sub-Bild zu einem Polygon mit sechs Eckpunkten, wodurch auf Basis der Geometriebeziehungen unrealistische Lagen des HOV0-Punkts ausgeschlossen werden. In Abbildung 5.3 sind die ROIs mit den Polygonzügen für den linken und den rechten Scheinwerfer dargestellt. Da für die Kalibrierung eine Veränderung der Scheinwerferausrichtung notwendig ist, werden die Sub-Bilder entsprechend den Richtungsänderungen auf dem Kamerabild angepasst, Abbildung C.1 in Anhang C.1.

¹Die Detektionsdistanz ist auf die Hinterachse des jeweiligen Fahrzeugs bezogen, hier beträgt der Abstand zwischen Scheinwerfer und Hinterachse 3,5 m.

²Die Sub-Bilder haben eine Größe von 303×203 Pixeln (linker Scheinwerfer) und von 332×250 Pixeln (rechter Scheinwerfer).

Bildvorverarbeitung: Im Folgenden wird die Bildvorverarbeitung für ein Sub-Bild vorgestellt. Die Ausführungen sind auf das zweite relevante Sub-Bild übertragbar. Der Kontrast der HDG an der jeweiligen Projektionsfläche kann nach den Ausführungen in Abschnitt 5.1 große Unterschiede aufweisen. Das Hauptaugenmerk der Bildvorverarbeitung richtet sich folglich auf eine Kontrastanpassung des Bilds. Aus der Literatur sind Methoden zur Kontrastanpassung nach der *Histogram Equalization* und der darauf aufbauenden *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* bekannt. Hierbei werden die Grauwerte, die im Histogramm die größten Häufigkeiten aufweisen, auf den gesamten Grauwertbereich verteilt, wodurch diese entsprechend weit voneinander entfernt liegen [119]. Über eine Transformationsfunktion, Gleichung (5.2), wird einem Grauwert j des Ursprungbilds ein anderer Grauwert j' zugeordnet. Zur Generierung der Transformationsfunktion ist ein kumulatives Grauwertshistogramm $\bar{h}(i)$, Gleichung (5.1), notwendig [26]. Die Häufigkeit $\bar{h}(i)$ eines Grauwerts i im kumulativen Histogramm \bar{h} ist abhängig von den Häufigkeiten³ $p(j)$ der vorangegangenen Grauwerte im Ursprungsbild. Die Transformationsfunktion setzt die abgeleiteten kumulativen Häufigkeiten in das Verhältnis zu der Gesamtanzahl der Pixel $M \times N$ des Bilds, unter Abzug des minimalen kumulativen Häufigkeitswerts \bar{h}_{\min} . Nach der Multiplikation mit der maximal möglichen Graustufe G bzw. $G - 1$ ist der vollständige Grauwertbereich des Bilds erreichbar, siehe auch [139].

$$\bar{h}(i) = \sum_{j=0}^i h(j) = \sum_{j=0}^i p(j) \quad (5.1)$$

$$j' = \text{round} \left(\frac{\bar{h}(j) - \bar{h}_{\min}}{(M \times N) - \bar{h}_{\min}} \times (G - 1) \right) \quad (5.2)$$

Allerdings muss bei den vorgestellten Methoden berücksichtigt werden, dass bei homogenen Flächen nur geringfügige Unterschiede im Ursprungshistogramm bestehen, wodurch es zu einer großflächigen Verstärkung des Rauschens im transformierten Bild kommen kann. Bei einer Abblendlichtverteilung sind entsprechende homogene Bereiche unterhalb der HDG zu erwarten. Die entstehenden Kanten bzw. Strukturen können eine nachfolgende Merkmalsextraktion beeinflussen.

Auf Basis des erweiterten Verfahrens der *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*, kurz *CLAHE*⁴, werden Untersuchungen durchgeführt, die die Reduzierung des Rauschens durch die Unterteilung der Bildbereiche und die Nutzung eines Schwellwerts bei der Kontrastanpassung aufzeigen. Der Schwellwert wird durch die Multiplikation eines Faktors (Clip-Limit) mit der durchschnittlichen Häufigkeit der Grauwerte im Histogramm berechnet. Die Grauwerte deren Häufigkeiten oberhalb des Schwellwerts liegen werden erfasst. Die Differenzen zwischen den jeweiligen Histogrammwerten dieser Grauwerte und dem Schwellwert werden bestimmt.

³Die Häufigkeit $p(j)$ entspricht dem Histogrammwert $h(j)$.

⁴Mittels *CLAHE* wird der zu untersuchende Bildbereich nochmals unterteilt, wodurch individuelle Kontrastanpassungen in den hellen und den dunklen Bereichen des Bilds möglich sind [56]. Die maximale Kontrastanhebung wird begrenzt [119].

Die Summe der Differenzen gibt die Häufigkeit an, die gleichmäßig über das Histogramm verteilt wird. Die Ausführung der Kontrastanpassung zeigt mit einer Filtergröße von acht und einem Clip-Limit von zwei gute Ergebnisse [139].

Dennoch muss bei der Kontrastanpassung mit einer Vergrößerung des Rauschens gerechnet werden, was eine Glättung des Bilds notwendig macht. Um die geometrische Orientierung der H0V0-Punkte jedoch nicht zu stark zu beeinträchtigen, wird vor der Anpassung ein Median-Filter⁵ zur Rauschunterdrückung und nach der Anpassung ein Bilateral-Filter⁶ zur Vermeidung einer Weichzeichnung der Kanten und zur Glättung durchgeführt. Abbildung 5.4 zeigt für den linken Scheinwerfer ein Kantenbild auf Basis einer adaptiven Kontrastanpassung, weitere Bilder siehe Abbildung C.2, Anhang C.1.

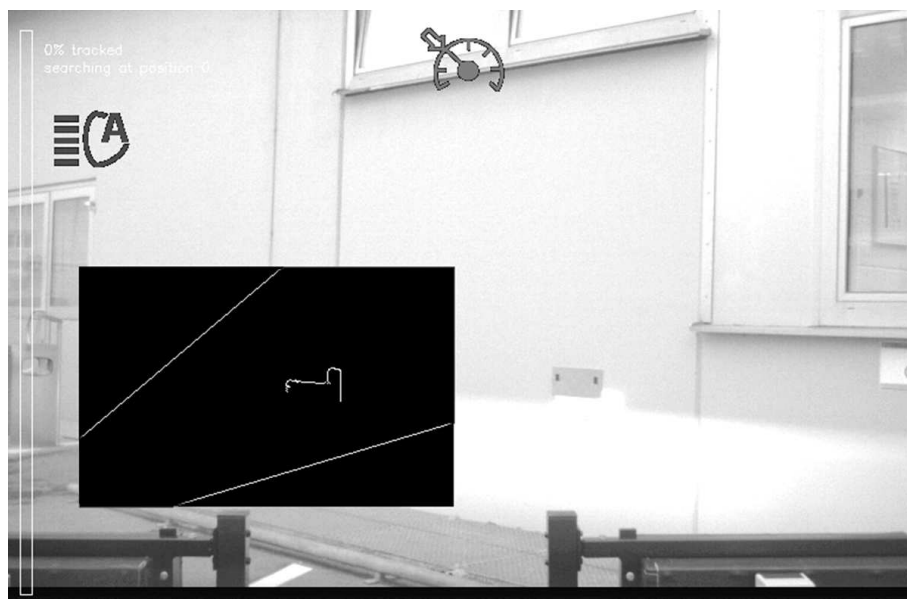


Abbildung 5.4: Rohbild der Kamera mit adaptiver Bildverarbeitung in der ROI des linken Scheinwerfers

⁵Nichtlineares Rangordnungsfiler [119].

⁶Nichtlineares Filter, abgeleitet aus Gauß-Filter, bewertet nicht nur den Pixelabstand, sondern auch die Grauwertunterschiede.

5.1.2 Merkmalsextraktion

Die HDG ist unter Berücksichtigung ihrer geometrischen Orientierung ein Indiz für die Fehlstellung der Hauptscheinwerfer, Abschnitt 4.1.1, und im Hinblick der Bildverarbeitung ein markantes Merkmal der Scheinwerferlichtverteilung. Die Nutzung des H0V0-Punkts als zu extrahierendes Merkmal ist folglich die logische Konsequenz. Unter der Annahme, dass die HDG aus den Wendepunkten der vertikalen Beleuchtungsstärkeverläufe auf einer Projektionsfläche bestimmt werden kann, Abschnitt 3.2.1, wird eine Kantendarstellung und eine Kantenerkennung auf den vorverarbeiteten Bildbereichen, Abschnitt 5.1.1, durchgeführt.

Kantendarstellung: Für die Umwandlung des vorverarbeiteten Bilds in ein Kantebild wird der aus der Literatur bekannte *Canny-Algorithmus* verwendet [28], [46], [119]. Dieser umfasst eine Glättung des Bilds über eine Faltung mit einem Gauß-Filter [46], gefolgt von einer partiellen Ableitung über eine Faltung mit einem Sobel-Filter [46] in vertikaler und in horizontaler Richtung. Aus den durchgeführten Faltungsoperationen mit den beiden Sobel-Operatoren ist eine Ableitung der Kantenrichtung und der Kantenstärke möglich. Über die Methode der *Non-Maximum-Suppression* werden die Kantenbreiten auf einen Pixel reduziert [27]. Nachfolgend wird über ein Hystereseverfahren mit zwei statischen Schwellwerten (T_1, T_2) , wobei $T_2 > T_1$ gilt, die Kantendarstellung dahingehend verändert, dass lediglich Pixelpositionen eines Grauwerts j mit $j > T_2$ als sichere Kanten geführt werden. Für Pixelnachbarn mit $T_2 > j > T_1$ wird eine Zugehörigkeit zur sicheren Kante der bereits erwähnten Pixelposition mit $j > T_2$ angenommen.

Auf Basis statischer Schwellwerte ist die Erkennung der HDG jedoch eingeschränkt, da durch die in Abschnitt 5.1 vorgebrachten Einflussfaktoren Veränderungen der Kontrastverhältnisse im Bereich der HDG bestehen. Eine manuelle Nachregelung der Schwellwerte zeigt, dass trotz der Einflussfaktoren eine Kantendarstellung der HDG möglich ist [139]. Daher wird für das weitere Vorgehen eine Bestimmung der Schwellwerte (T_1, T_2) nach der Methode *Otsus* durchgeführt [91]. Die *Otsu-Methode* nutzt die Informationen des Histogramms als Angabe für die Wahrscheinlichkeiten einer diskreten Zufallszahl Z und teilt das Histogramm h für einen zu bestimmenden Grauwert t , sodass zwei Klassen $(K_0(t) = \{0, \dots, t\}$ und $K_1(t) = \{t + 1, \dots, G - 1\})$ entstehen [46]. Die Bestimmung des Grauwerts t beruht auf einer Varianzanalyse, die nachfolgend anhand der Gleichungen (5.3), (5.4), (5.5), (5.6), (5.7) und (5.8) erläutert wird, vergleiche hierzu ebenfalls [46]. Die Menge an Grauwerten, die für ein Bild genutzt wird, wird durch $\{0, \dots, G\}$ beschrieben. Für die angesprochene Zufallsvariable gilt $Z : \Omega \rightarrow \{0, \dots, G\}$, wobei die Wahrscheinlichkeit für einen Grauwert von j durch $P[Z = j] = p'(j)$, Gleichung (5.3), ausgedrückt wird. Nach *Otsu* sind die Klassen gut trennbar, wenn die Teilung des Histogramms durch t so gewählt wird, dass die Varianz innerhalb der Klassen $\sigma_{\text{in}}^2(t)$ gering und die Varianz zwischen den Klassen $\sigma_{\text{zwi}}^2(t)$ hoch ist. Die Teilung ist folglich für einen maximalen Quotienten $Q(t)$, Gleichung (5.9), gegeben und geht mit $T_2 = t$ in den *Canny-Algorithmus* ein⁷.

⁷Der zweite Schwellwert T_1 wird über einen konstanten Faktor aus T_2 bestimmt.

$$p'(j) = \frac{h(j)}{\sum_{j=0}^G h(j)} \quad (5.3)$$

$$P_0(t) = \sum_{j=0}^t p'(j) \quad (5.4)$$

$$P_1(t) = \sum_{j=t+1}^G p'(j) \quad (5.5)$$

$$\mu_0(t) = \frac{\sum_{j=0}^t p'(j) \cdot j}{P_0(t)} \quad (5.6)$$

$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{j=t+1}^G p'(j) \cdot j}{P_1(t)} \quad (5.7)$$

$$\sigma_0^2(t) = \sum_{j=0}^t (j - \mu_0(t))^2 \cdot p'(j) \quad (5.8)$$

$$\sigma_1^2(t) = \sum_{j=t+1}^G (j - \mu_1(t))^2 \cdot p'(j) \quad (5.9)$$

$$\sigma_{\text{in}}^2(t) = P_0(t) \cdot \sigma_0^2(t) + P_1(t) \cdot \sigma_1^2(t) \quad (5.8)$$

$$\sigma_{\text{zw}}^2(t) = P_0(t) \cdot (\mu - \mu_0(t))^2 + P_1(t) \cdot (\mu - \mu_1(t))^2$$

$$Q(t) = \frac{\sigma_{\text{zw}}^2(t)}{\sigma_{\text{in}}^2(t)} \quad (5.9)$$

Für die Bestimmung der Größen $\sigma_{\text{in}}^2(t)$ und $\sigma_{\text{zwi}}^2(t)$ (5.8) sind die Wahrscheinlichkeiten der beiden Klassen $P_0(t)$ und $P_1(t)$, Gleichung (5.4), die bedingten Erwartungswerte der Klassen $\mu_0(t)$ und $\mu_1(t)$, Gleichung (5.6), sowie die bedingten Varianzen der Klassen $\sigma_0^2(t)$ und $\sigma_1^2(t)$, Gleichung (5.7), zu berechnen. Ebenso wird die Kenntnis des Erwartungswerts μ für die Zufallsvariable Z vorausgesetzt, Gleichung (5.5).

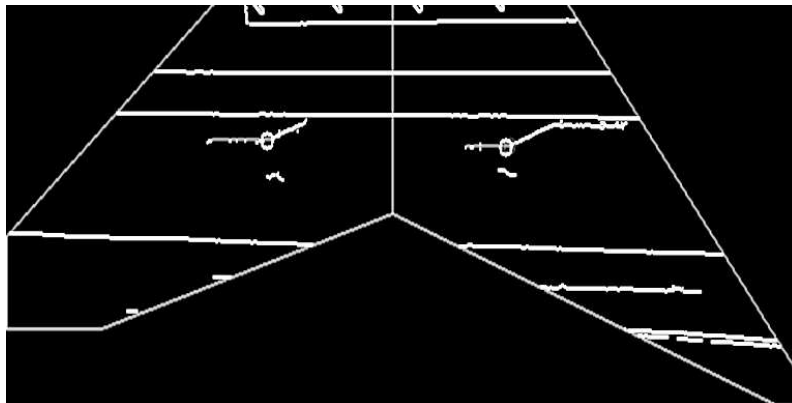


Abbildung 5.5: Kantendarstellung und Erkennung der H0V0-Punkte in den ROIs

Für weitere Informationen zur Umsetzung der adaptiven Schwellwertanpassung sei auf [139] verwiesen. Die Abbildungen 5.4 und 5.5 zeigen die jeweiligen Kantendarstellungen der HDG in verschiedenen Szenen mit unterschiedlichen Lichtverhältnissen.

Kantenerkennung: Im Folgenden wird auf Basis des abgeleiteten Kantenbilds eine Kantenerkennung angewandt, die die Bestimmung des H0V0-Punkts ermöglicht. Für die Erkennung der Kanten wird das Verfahren der *Hough-Transformation* verwendet, das aus der Literatur bekannt ist [27], [119], [45]. Die *Hough-Transformation* nutzt die Darstellung einer Geraden nach Gleichung (5.10), die über die Hesse'sche Normalform⁸ hergeleitet werden kann [45]. Grundlegend wird durch die *Hough-Transformation* ein Punkt $I(x_i, y_i)$ von einem Bildraum in einen Hough-Raum $I(\psi, d)$ transformiert. Im Hough-Raum wird der Punkt des Bildraums durch eine Kurve dargestellt. Bildet der angesprochene Punkt mit weiteren Punkten eine Gerade im Bildraum, so schneiden sich die Kurven im Hough-Raum an derselben Position. Die Gerade wird folglich als Punkt dargestellt, dessen Intensität sich im Hough-Raum umso weiter steigert, je mehr Punkte der Geraden angehören. Abschließend kann über die Bestimmung lokaler Maxima im transformierten Raum auf eine Gerade im Bildraum geschlossen werden [119], [45].

$$d = x_i \cdot \cos(\psi) + y_i \cdot \sin(\psi) \quad (5.10)$$

Die Methodik der *Hough-Transformation* macht es möglich, lediglich nach Kanten eines bestimmten Winkelbereichs zu suchen. Für die Erkennung des Anstiegs und der Horizontalen der HDG, Abschnitt 2.1.1, werden bei einem Serienscheinwerfer zwei *Hough-Transformationen* verwendet, wobei die zu suchenden Winkel des Anstiegs zwischen $+12^\circ$ und $+30^\circ$ liegen. Die Winkel der Horizontalen werden in einem Bereich zwischen -3° und $+11^\circ$ angenommen. Die Winkelwerte gehen auf Untersuchungen⁹ eines Serienscheinwerfers¹⁰ im Labor zurück. Aus der Perspektive des Scheinwerfers kann die HDG als winkeltreue Abbildung gesehen werden. Unter dem Einfluss der Parallaxe und der weitläufigen Projektionsmöglichkeiten trifft dies jedoch nicht mehr uneingeschränkt zu, was den beschriebenen Vorhalt hinsichtlich der angesprochenen Winkelbereiche notwendig macht [139]. Weitere Einflussmöglichkeiten bei der Ausführung der *Hough-Transformation* sind durch die Definition der minimalen Lückenlängen der Kanten sowie durch die Längen- und die Winkelauflösungen der Akkumulatorzellen [27], [119], [45] gegeben.

⁸ $\vec{x}_g \cdot \vec{n}_0 = d$, Abstand d zwischen Gerade und Ursprung, Einheitsvektor \vec{n}_0 senkrecht zur Richtung \vec{x}_g der Geraden g , vergleiche [86].

⁹Die Winkelbeziehungen können über das Referenzmessverfahren, Abschnitt 6.1.3, bestimmt werden.

¹⁰Porsche Dynamic Light System +, LED-Scheinwerfer, Porsche 911 (991).

Abbildung 5.6 zeigt schematisch die HDG und den H0V0-Punkt eines Scheinwerfers sowie eine Hough-Linie für die Horizontale und eine Hough-Linie für den Anstieg. Der Schnittpunkt beider Hough-Linien skizziert den detektierten H0V0-Punkt durch die Bildverarbeitung. Ersichtlich ist, dass von einer Abweichung zum realen H0V0-Punkt ausgegangen werden muss, worauf in Abschnitt 5.2.1 detaillierter eingegangen wird. Bevor eine Erkennung des H0V0-Punkts möglich ist, muss zunächst ein Paar aus einer Horizontalen und einem Anstieg gefunden werden, um die Schnittpunkt-Bestimmung durchzuführen.

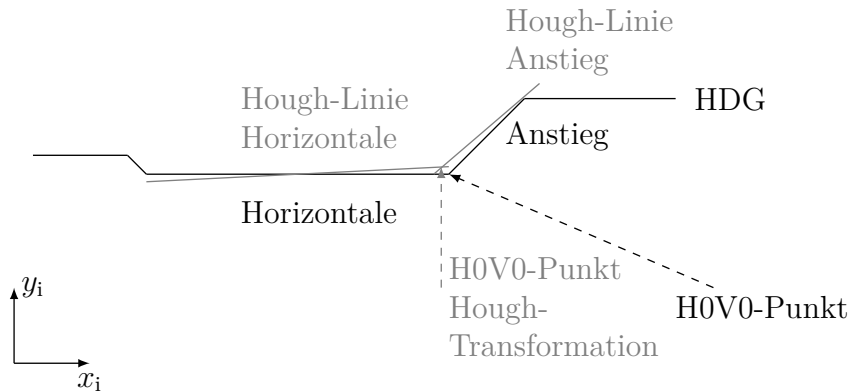


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der HDG mit H0V0-Punkt und den entsprechenden Hough-Linien

Abbildung 5.7 illustriert eine Szene, in der zwei potenzielle Anstiege und zwei Horizontale dargestellt sind. Die Kombinationen ermöglichen theoretisch vier H0V0-Punkte. Um reproduzierbar eine plausible Erkennung der charakteristischen Punkte zu gewährleisten, wird eine spezielle Vorgehensweise definiert.

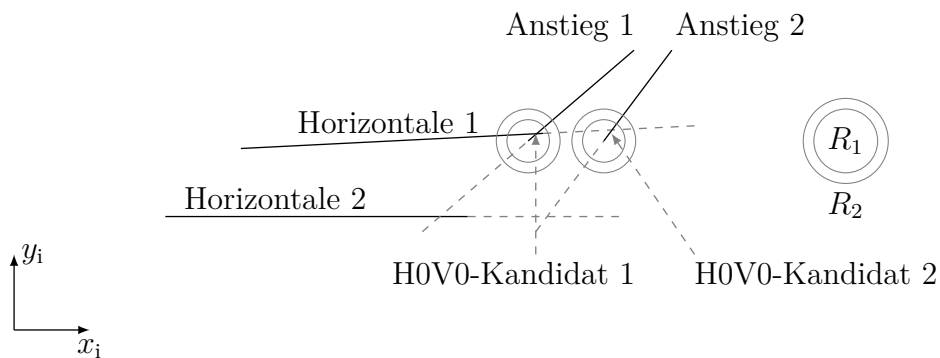


Abbildung 5.7: Auswahl des plausiblen Hough-Linien-Paares für die Bestimmung des H0V0-Schnittpunkts

1. Nach Definition ist der Anfangspunkt einer Horizontalen der Punkt, der näher am linken Bildrand liegt.
2. Nach Definition ist der Anfangspunkt eines Anstiegs der Punkt, der näher am unteren Bildrand liegt.
3. Jeder Anstiegs-Kandidat erhält zwei parametrierbare Kreise (R_1 , R_2) um den Anfangspunkt.
4. Zu jedem Anstiegs-Kandidaten werden potenzielle Horizontal-Kandidaten gesucht.
5. Der Anfangspunkt der Horizontalen liegt im Vergleich zum Anfangspunkt des Anstiegs weiter links im Bild.
6. Der Anfangspunkt der Horizontalen liegt im Vergleich zum Endpunkt des Anstiegs weiter unten im Bild.
7. Ein Schnittpunkt zwischen Horizontale und Anstieg wird als H0V0-Kandidat bezeichnet, wenn dieser innerhalb des Kreises R_1 und die zugehörige Horizontale nicht außerhalb des Kreises R_2 liegt.
8. Sollten mehrere H0V0-Kandidaten vorhanden sein, wird der Kandidat ausgewählt, der die kleinsten Abstandsbeziehungen aufweist.
9. Sollten keine H0V0-Kandidaten auffindbar sein, wird ein Defaultwert gesendet.

Unter Berücksichtigung der Spezifikationen kann aus den in Abbildung 5.7 dargestellten vier möglichen charakteristischen Punkten der plausibelste Punkt ausgewählt werden. Die Anforderung, dass ein Schnittpunkt der Horizontalen und des Anstiegs innerhalb des Kreises mit dem Radius R_1 liegen muss, reduziert die möglichen H0V0-Kandidaten von vier auf zwei. Die nachgelagerte Forderung, dass der Endpunkt der Horizontalen mindestens innerhalb des Radius R_2 liegen muss, zeigt eindeutig, dass der H0V0-Kandidat 1 als charakteristischer Punkt erkannt wird. Die Radien der Kreise sind parametrierbar. Der Ablauf der Suche geeigneter Partner geht immer vom Anstieg aus, da dieser im Verkehrsraum weniger oft vorliegt.

Tabelle 5.1: Verteilung der Systemlaufzeit für die adaptive Bildverarbeitung

Zeit [ms]	Bildvorverarbeitung		Merkmalsextraktion	
	Segmentierung	Kontrast-anpassung	Otsu-Canny	Hough-Transformation
durchschnittlich	3,65 ms	6,32 ms	2,93 ms	2,52 ms
maximal	5,41 ms	11,05 ms	5,09 ms	4,59 ms

In Abbildung 5.5 ist eine Kantendarstellung der HDGs des linken und des rechten Scheinwerfers im Verkehrsraum zu sehen. Die weißen Kreise im Bereich der H0V0-Punkte zeigen die Schnittpunkte der jeweils erkannten Anstiege mit den dazugehörigen Horizontalen. In Summe ist die beschriebene adaptive Bildverarbeitung

innerhalb der Systemlaufzeit der Kamera¹¹ umsetzbar und eignet sich für die Erkennung der charakteristischen Punkte, siehe Tabelle 5.1.

5.2 Systemsteuerung

Die aktive Triangulation zwischen dem Lichtbild der Scheinwerfer und der Kamera erfordert eine Zuordnung der detektierten H0V0-Punkte zu den Verfahrenswinkeln der Scheinwerfer. Die Systemsteuerung sieht ein zweistufiges Trackingverfahren vor, dass die erkannten H0V0-Punkte der adaptiven Bildverarbeitung bezüglich deren Plausibilität bewertet, Abschnitt 5.2.1. Die Ansteuerung der Hauptscheinwerfer realisiert die Synchronisierung zwischen der Verlagerung der Lichtverteilung und der Kameradetektion, Abschnitt 5.2.3. Die Aktivierung und die Deaktivierung des Gesamtsystems werden in Abschnitt 5.2.2 thematisiert. Die Zusammenhänge der Systemsteuerung sind in Abbildung 5.8 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

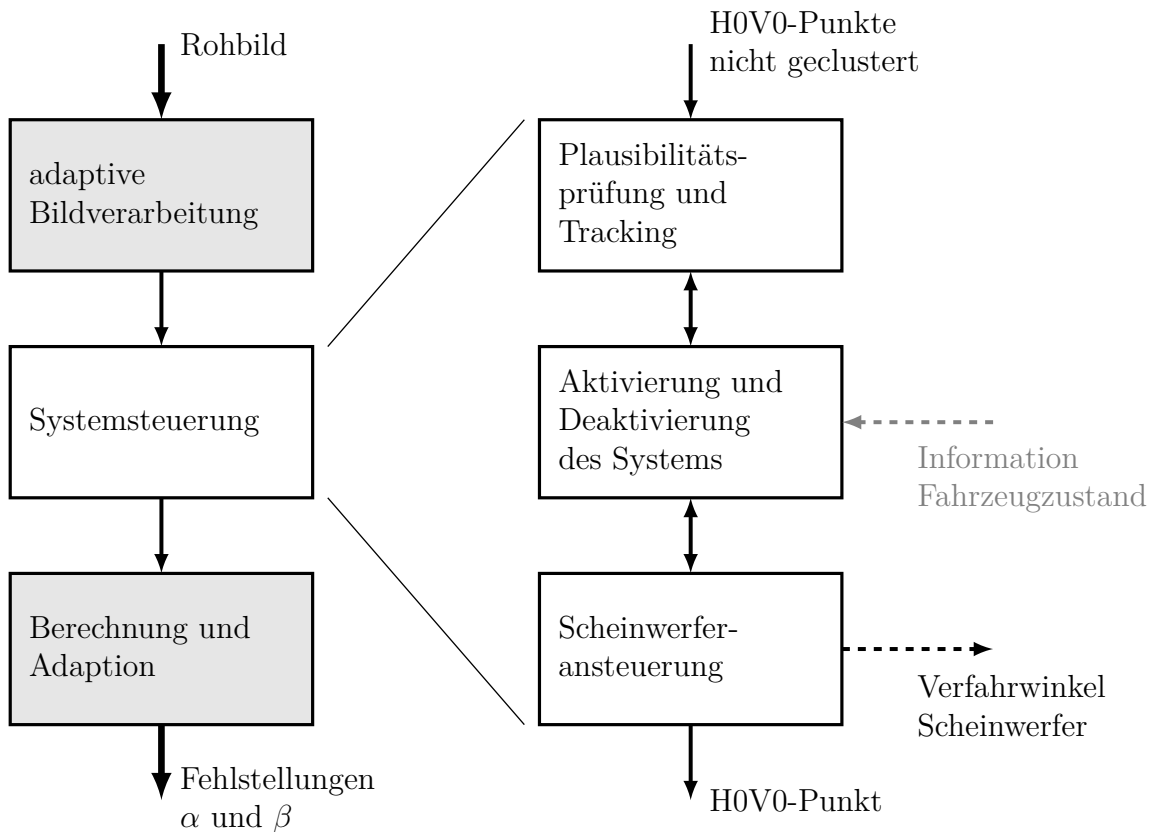


Abbildung 5.8: Ablauf der Systemsteuerung

¹¹Die Systemlaufzeit der Entwicklerkamera beträgt 45 ms.

5.2.1 Plausibilitätsprüfung und Tracking

Die Merkmalsextraktion, Abschnitt 5.1.2, übergibt der Systemsteuerung im Idealfall pro Frame einen detektierten H0V0-Punkt. Eine Folge dieser H0V0-Punkte wird innerhalb einer definierten Framesequenz einem Tracking [41], Abschnitt 2.3.1, unterzogen. In der Folge wird ein H0V0-Punkt bestimmt, der hinreichend genau dem realen H0V0-Punkt der HDG in der jeweiligen Verfahrsposition des Scheinwerfers entspricht, Abbildung 5.8.

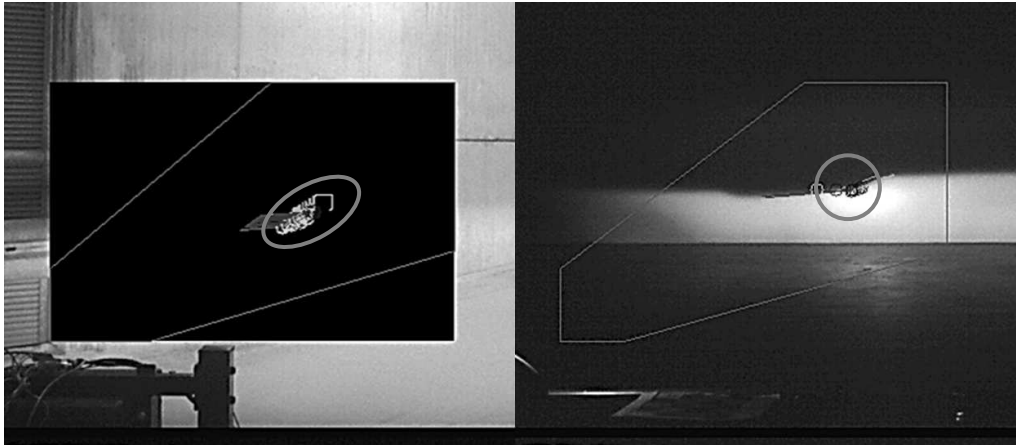


Abbildung 5.9: Detektierte H0V0-Punkte unter dynamischen (links, Ellipse) und unter statischen Bedingungen (rechts, Kreis)

Für das angesprochene Trackingverfahren wird eine Cluster-Analyse verwendet. Verfahren zur Cluster-Analyse werden zum Auffinden von Gruppierungen genutzt [10] und stellen einen unüberwachten Ansatz dar [139], der keine Trainingsdaten erfordert. Die erkannten potenziellen H0V0-Punkte eines charakteristischen Punkts auf dem Kamerabild können als entsprechende Gruppierungen angesehen werden. Im statischen wie auch im dynamischen Fall kann davon ausgegangen werden, dass ein räumlicher Zusammenhang zwischen den erkannten H0V0-Punkten besteht, falls die reale HDG hinreichend genau erkannt wird. Unter statischen Bedingungen bilden die erkannten H0V0-Punkte für eine definierte Verfahrswinkelkombination des Scheinwerfers näherungsweise einen Häufungspunkt. Bei einer Veränderung der Distanz zwischen Scheinwerfer und Projektionsfläche durch dynamische Bedingungen ist aufgrund der Parallaxe eine Ansammlung der detektierten H0V0-Punkte entlang einer Geraden erkennbar, siehe hierzu Abbildung 5.9. Diese Sachverhalte müssen bei der Auswahl der Cluster-Analyse beachtet werden. Ebenso gilt es Fehldetektionen zu identifizieren, die abseits der beschriebenen Formen auf dem Kamerabild entstehen können. Für das Tracking der H0V0-Punkte ist auf Basis der Formunabhängigkeit des Clusters und der Erkennung möglicher Ausreißer ein entsprechender Ansatz zu wählen.

In der Folge wird das *Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise*¹², kurz *DBSCAN*, genutzt, um eine dichte-basierte Cluster-Analyse durchzuführen [35]. *DBSCAN* erfüllt die Anforderungen hinsichtlich der Formunabhängigkeit des Clusters und der Ausreißerererkennung. Grundlegend wird für das Verfahren eine Dichteverbundenheit¹³ ρ_{DBSCAN} und eine minimale Anzahl $P_{\text{DBSCAN},\text{min}}$ an Cluster-Punkten definiert. Der Algorithmus bestimmt für jeden Punkt den Abstand¹⁴ D_{DBSCAN} zu den umliegenden Nachbarn. Dabei werden die Nachbarn eines Punkts als dichteerreichbar definiert, die innerhalb eines Radius ρ_{DBSCAN} um den Punkt liegen. Sind insgesamt mehr als $P_{\text{DBSCAN},\text{min}}$ Punkte dichteerreichbar, besteht ein Cluster [35]. Überlappen sich mehrere gefundene Cluster, werden diese zu einem Cluster zusammengefasst. Den Kernpunkten eines Clusters wird die gleiche ID zugeordnet. In Abbildung 5.10 ist das Verfahren schematisch dargestellt. Für einen Rauschpunkt ist kein weiterer Nachbar dichteerreichbar.

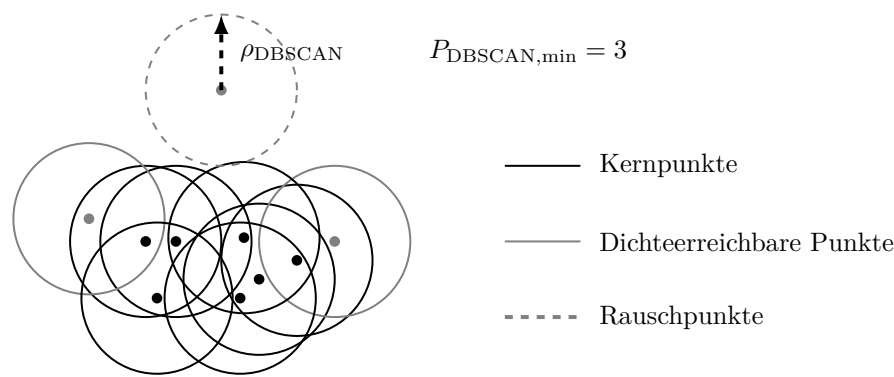


Abbildung 5.10: Dichtebasiertes Clusterverfahren mittels DBSCAN, vergleiche [35]

Durch die Parametrierung entsteht ein Zielkonflikt zwischen der Erkennungsrate und der Erkennungsqualität. Eine erhöhte Dichteverbundenheit ρ_{DBSCAN} und eine verringerte Minimalanzahl der Nachbarn $P_{\text{DBSCAN},\text{min}}$ fördern die Erkennungsrate bei dynamischen Bedingungen, wohingegen ein erhöhtes $P_{\text{DBSCAN},\text{min}}$ und ein niedriges ρ_{DBSCAN} die Trackingqualität verbessern. Im Systemablauf wird das Tracking als zweistufiger Prozess betrachtet, der in der ersten Stufe einen Status hinsichtlich einer möglichen Erkennung etwaiger H0V0-Punkte prüft (Plausibilitätsprüfung). Für diesen Fall wird *DBSCAN* über dessen Parameter in Richtung einer höheren Erkennungsrate optimiert. Hier ist lediglich entscheidend, ob relevante Cluster vorliegen. In der zweiten Stufe wird die Gewinnung qualitativer H0V0-Punkte für den Berechnungsprozess verfolgt (Tracking), was eine erhöhte Trackingqualität erfordert. Eine erneute Veränderung der Parameter für *DBSCAN* ist daher umzusetzen [139]. Die experimentellen Untersuchungen zeigen für eine Dichteverbundenheit von $\rho_{\text{DBSCAN}} = 5$ und für eine Trackingdauer von 7 Frames, 30 Frames und 100 Fra-

¹²Für *DBSCAN* ist keine vordefinierte Cluster-Anzahl notwendig. *DBSCAN* ist unabhängig von der Cluster-Form und kann bei großen Datenmengen eingesetzt werden [35]. *DBSCAN* markiert Ausreißer [35].

¹³Zwei Punkte gelten als dichteverbunden, wenn es einen dritten Punkt gibt, der ausgehend von beiden Punkten innerhalb des jeweiligen Kreises mit Radius ρ_{DBSCAN} liegt [35].

¹⁴Euklidischer Abstand zweier Punkte $I(x_i, y_i)$ und $J(x_j, y_j)$ mit $D_{\text{DBSCAN}}(I, J) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$.

mes bei einer Wiederholrate von 22 fps, dass ein längeres Tracking die Kalibrierergebnisse¹⁵ unter statischen Bedingungen nur bedingt verbessert $\sigma_{\beta,7\text{fps}} = 0,4814^\circ$, $\sigma_{\beta,30\text{fps}} = 0,2305^\circ$ und $\sigma_{\beta,100\text{fps}} = 0,2792^\circ$. Folglich wird die Trackingsequenz zu 30 Frames bestimmt [139].

Für die weitere Bestimmung der qualitativen H0V0-Punkte, die im Berechnungsverfahren verwendet werden, wird das Cluster-Zentrum über den Median bestimmt. Der Median ist als robuster Schätzer bekannt, da einzelne Ausreißer das Ergebnis nicht verschlechtern [46]. Insgesamt zeigen die Messergebnisse die Tendenz nach links in Blickrichtung auf die Projektionsfläche abzuweichen, siehe hierzu die Abbildungen B.10 und B.11 im Anhang B.2.2. Der Grund für diesen Umstand ist die Form der HDG und die toleranzbehaftete Erkennung des Anstiegs durch die *Hough-Transformation*. Abbildung 5.11 zeigt im linken Teil des Bilds eine Ansammlung potenzieller H0V0-Punkte, die zu einem Cluster bestimmt werden, da die Forderungen nach der Dichteverbundenheit ρ_{DBSCAN} und der Minimalanzahl an Nachbarn $P_{\text{DBSCAN},\text{min}}$ erfüllt werden. Das rechte Bild der Abbildung 5.11 zeigt den resultierenden H0V0-Punkt, der in das Berechnungsverfahren eingeht.

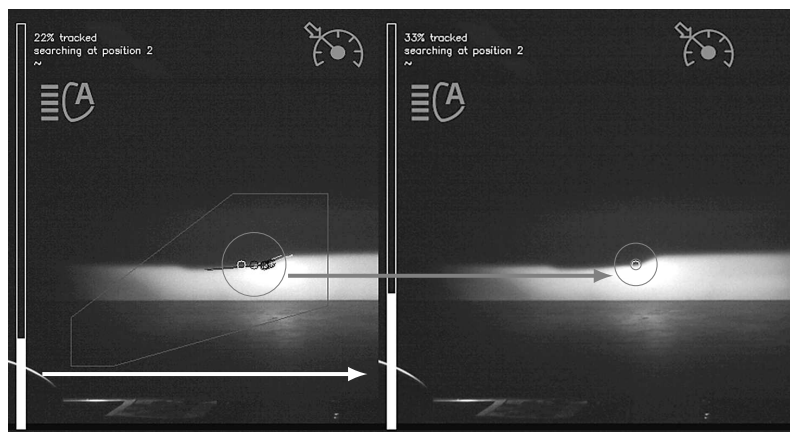


Abbildung 5.11: Trackingprozess der detektierten H0V0-Punkte

5.2.2 Aktivierung und Deaktivierung des Gesamtsystems

Die Einschalt- und Ausschaltbedingungen der automatisierten Scheinwerfereinstellung werden durch die Geschwindigkeit, den Lichtsensorzustand, die Lichtanforderungen durch den Lichtalgorithmus und den Systemstatus der Kamera gesteuert.

Unter Berücksichtigung der maximal möglichen Trackingdistanz von 16 m, Abschnitt 5.1.1, und der Einflüsse der Dynamik auf die Qualität des Trackingverfahrens, Abschnitt 5.2.1, liegt der aktive Bereich des Kalibrierverfahrens unter einer definierten Geschwindigkeitsschwelle von 20 km/h. Die Schwelle wird zu 20 km/h gewählt, da unterhalb dieser Geschwindigkeit eine Erkennung der H0V0-Punkte auf der Basis von 30 Frames bei einer Wiederholrate von 22 fps durchführbar ist.

¹⁵Dargestellt wird die Standardabweichung der vertikalen Fehlstellung β des Scheinwerfers.

Die geschwindigkeitsbasierte Aktivierung des Systems wird zusätzlich durch eine Hysterese abgesichert, um ein mögliches Toggeln zu verhindern. Folglich ist das System erst unterhalb von 10 km/h aktiv und wird bis zu einer Geschwindigkeit von 20 km/h ausgeführt.

Eine weitere Einschalt- bzw. Ausschaltbedingung ist der Lichtsensor. Das System wird erst aktiv, nachdem der Lichtsensor Dunkelheit meldet. Eine Ausführung der Kalibrierung ist durch den adaptiven Bildverarbeitungsalgorithmus bereits unter bestimmten Bedingungen möglich, bei denen der Lichtsensor Helligkeit meldet. Allerdings sind diese Fälle sehr unwahrscheinlich und werden daher vernachlässigt.

Ein der automatisierten Scheinwerfereinstellung übergeordnetes System ist der im Fahrzeug integrierte Lichtalgorithmus, der die Ansteuerung der Scheinwerfer im Zuge der Kalibrierung immer überstimmt. Das Kalibrierverfahren ist ähnlich wie der Fernlichtassistent, Abschnitt 2.3.2, als Komfortfunktion zu sehen, die einer manuellen Fernlichtanforderung durch den Fahrer unterliegt. Darüber hinaus ist das System nur aktiv, wenn der Lichtschalter auf Auto steht. Stellt der Fahrer den Drehlichtschalter auf manuell, wird das System inaktiv, vergleiche Abschnitt 2.2.3.

Alle genannten Einschaltbedingungen führen jedoch nicht zum endgültigen Start des Systems. Die Statusmeldung der Kamera ist entscheidend für den Systemstart. Die in Abschnitt 5.2.1 dargestellte Plausibilitätsprüfung mit speziellen Parametern für die Dichteverbundenheit ρ_{DBSCAN} und die minimale Anzahl an Nachbarn $P_{\text{DBSCAN},\text{min}}$ sendet im Fall eines gefundenen Clusters den Status aktiv, der die Scheinwerfersteuerung durch das Kalibrierverfahren aktiviert und dadurch die Kalibrierung startet. Die Scheinwerferansteuerung wird nach Abschnitt 5.2.3 ausgeführt. Sollte die Erkennung der charakteristischen Punkte nicht mehr möglich sein, wird eine Wiederaufnahme der Onlinekalibrierung durch eine erneute Plausibilitätsprüfung gestartet. Wird bei dieser kein Cluster gefunden, wird der Ablauf vorerst gestoppt. Im Hintergrund führt die Kamera wiederholend die Plausibilitätsprüfung durch, wenn die restlichen Bedingungen für einen Kalibrierablauf erfüllt sind. Eine erneute Ausführung der Kalibrierung ist unter den genannten Bedingungen immer möglich.

5.2.3 Scheinwerferansteuerung

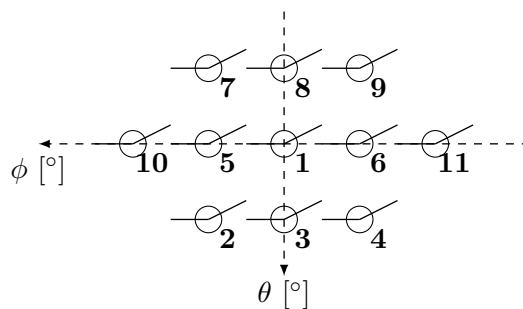
Durch die Veränderung der Scheinwerferausrichtung wird der aktive Teil des Triangulationsverfahrens umgesetzt. Im Folgenden wird die geometrische Orientierung des Scheinwerfers im Abblendlicht (Position 1) als Grundausrichtung und als erste Verfahrenposition bezeichnet. Die notwendigen weiteren Ausrichtungen des Scheinwerfers sind Tabelle 5.2 und Abbildung 5.12 zu entnehmen.

Für das Kalibrierverfahren ist die Synchronisation zwischen Lichtbild und Kameradetektion entscheidend. Während für die Aktivierung des Gesamtsystems unter anderem der Kamerastatus notwendig ist, Abschnitt 5.2.2, wird für die Synchronisation zwischen Scheinwerfer und Kamera eine Positionsrückmeldung des Scheinwerfers genutzt. Wird dem Scheinwerfer über seinen CAN-Bus eine Positionsanforderung übermittelt, setzt er diese um und sendet ein CAN-Signal ($S_{\text{Pos}} = 1$), womit

er bestätigt, dass er die angeforderte Position erreicht hat. Dieses Signal wird an die Einheit zur Scheinwerferansteuerung zurückgegeben und über den Systembaustein zur Aktivierung und Deaktivierung des Gesamtsystems an das Modul zur Plausibilitätsprüfung weitergeleitet, Abbildung 5.8. Zu diesem Zeitpunkt ist der Scheinwerfer in der Grundausrichtung. Der Trackingprozess setzt nach erfolgreicher erster Plausibilitätsprüfung (Kamerastatus aktiv) ein, falls die restlichen Einschaltbedingungen, Abschnitt 5.2.2, erfüllt sind (System aktiv).

Tabelle 5.2: Verfahrenswinkel der charakteristischen Positionen des Scheinwerfers

Verfahrenswinkel [°]	Charakteristische Positionen des Scheinwerfers					
	1	2	3	4	5	6
ϕ	$0,0^\circ$	$2,0^\circ$	$0,0^\circ$	$-2,0^\circ$	$2,0^\circ$	$-2,0^\circ$
θ	$0,0^\circ$	$1,5^\circ$	$1,5^\circ$	$1,5^\circ$	$0,0^\circ$	$0,0^\circ$
	7	8	9	10	11	
ϕ	$2,0^\circ$	$0,0^\circ$	$-2,0^\circ$	$4,0^\circ$	$-4,0^\circ$	
θ	$-1,5^\circ$	$-1,5^\circ$	$-1,5^\circ$	$0,0^\circ$	$0,0^\circ$	



$$N(11, w)$$

Abbildung 5.12: Schematische Darstellung der Verfahrenswinkelpositionen des Scheinwerfers mit Blick auf die Projektionsfläche

Für den Fall, dass der Trackingprozess zu keinem plausiblen Ergebnis führt, wird dieser gestoppt und der Scheinwerfer fährt die nächste Position an. Auch in diesem Fall ist das Tracking erst dann wieder zu starten, wenn die Rückmeldung des Scheinwerfers an das Modul für die Plausibilitätsprüfung und das Tracking gesendet wird ($S_{\text{Pos}} = 1$). Sollte auch unter den neuen Bedingungen kein H0V0-Punkt erkannt werden, fährt der Scheinwerfer wieder an die Ausgangsposition zurück. Die erneute Rückmeldung des Scheinwerfers initialisiert nach zweimaligem negativem Trackingergebnis die Plausibilitätsprüfung, die den neuen Kamerastatus ermittelt.

Ist die Plausibilitätsprüfung wieder erfolgreich, wird ein erneuter Kalibrierversuch gestartet, indem die erste Scheinwerferposition angefahren wird. Nachdem die Einheit für das Trackingverfahren die Information $S_{\text{Pos}} = 1$ erhält, beginnt erneut das Tracking. Ist dieses erfolgreich, bewegt sich der Scheinwerfer auf die nächste vordefinierte Position und der H0V0-Punkt wird der vorherigen Verfahrenswinkelposition zugeordnet.

Ein erneuter Trackingprozess setzt nach $S_{\text{Pos}} = 1$ ein. Dieser Ablauf wird so lange wiederholt, bis allen vordefinierten Scheinwerferpositionen ein H0V0-Punkt zugeordnet ist. Am Ende ist die Fehlstellung auf Basis der Datenmenge aus p Verfahrenswinkeln berechenbar, Abschnitt 4.3.2. Eine Erhöhung der Wiederholrate w des Kalibrierablaufs führt zu einer erneuten Ausführung der Verfahrenstrategie, bis w Kalibrierdurchführungen erreicht sind. Werden nicht alle Verfahrenswinkel mit einem H0V0-Punkt belegt, werden diese gezielt nochmals angesteuert. Demgegenüber stehen Verfahrenpositionen, die bereits einen H0V0-Punkt zugeordnet bekommen haben. Diese werden nicht noch einmal angefahren. Die Steuerung der beiden Hauptscheinwerfer erfolgt synchron.

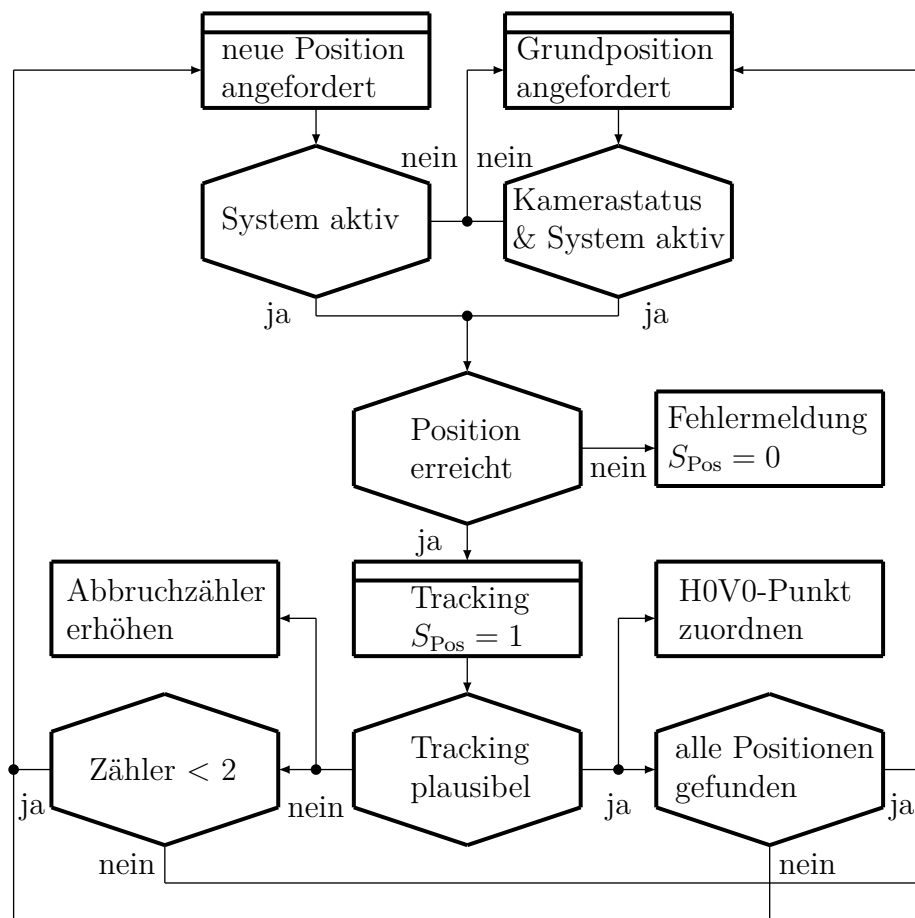


Abbildung 5.13: Ablauf der Scheinwerfersteuerung im Systemverbund mit der Plausibilitätsprüfung, dem Gesamtsystemstatus und dem Tracking

Die vorgestellte Steuerung der Hauptscheinwerfer ist in Abbildung 5.13 dargestellt und wird für die experimentellen Untersuchungen in Kapitel 6 genutzt. Die vertikale Verlagerung der HDG ist auf $\pm 1,5^\circ$ limitiert, obwohl nach Abschnitt 4.4.2 eine Verstellung um $\pm 3,0^\circ$ durch die Stellmotoren möglich ist. Diese Einschränkung ist notwendig, da für die Korrektur der vertikalen Fehlstellung ein Winkelbereich vorzuhalten ist, siehe hierzu Abschnitt 5.3.3. Die horizontale Verlagerung beträgt maximal $\pm 4,0^\circ$, da die ROIs für die Bildverarbeitung ansonsten im Detektionsbereich der HDG nicht getrennt werden können, vergleiche Abschnitt 5.1.1. Im Hinblick auf einen Serienumsetzung ist die dauerhafte Ansteuerung des Scheinwerfers nicht

kundentauglich. Folglich wird für diesen Fall ein anderes Konzept verwendet. Alternativ fährt der Scheinwerfer ebenfalls die vordefinierte Fahrpositionen an, bleibt auf dieser Position allerdings deutlich länger, wodurch mehr als ein H0V0-Punkt, insgesamt w H0V0-Punkte, dem jeweiligen Fahrwinkel zugeordnet werden können. Die minimale Anzahl der Bewegungen reduziert sich bei diesem Verfahren von $p \cdot w$ auf p . Die Synchronisierung muss in diesem Fall lediglich wieder bei einem Positionswechsel erfolgen.

5.3 Ermittlung und Anpassung der Scheinwerferausrichtung

Die resultierenden H0V0-Punkte werden von der Systemsteuerung an die Einheit zur Berechnung und zur Adaption der Scheinwerferausrichtung übergeben. Die Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung basiert auf der Wahl des passenden Modellansatzes und des dazugehörigen Berechnungsalgorithmus, Abschnitt 5.3.1. Die Schätzung der Endergebnisse wird durch eine Standardisierung und eine Bandpassfilterung durchgeführt, Abschnitt 5.3.2. Durch die Kenntnis der Scheinwerferausrichtung ergeben sich verschiedene Möglichkeiten zur Adaption der Lichtverteilung, Abschnitt 5.3.3. Die beschriebene Vorgehensweise ist in Abbildung 5.14 skizziert.

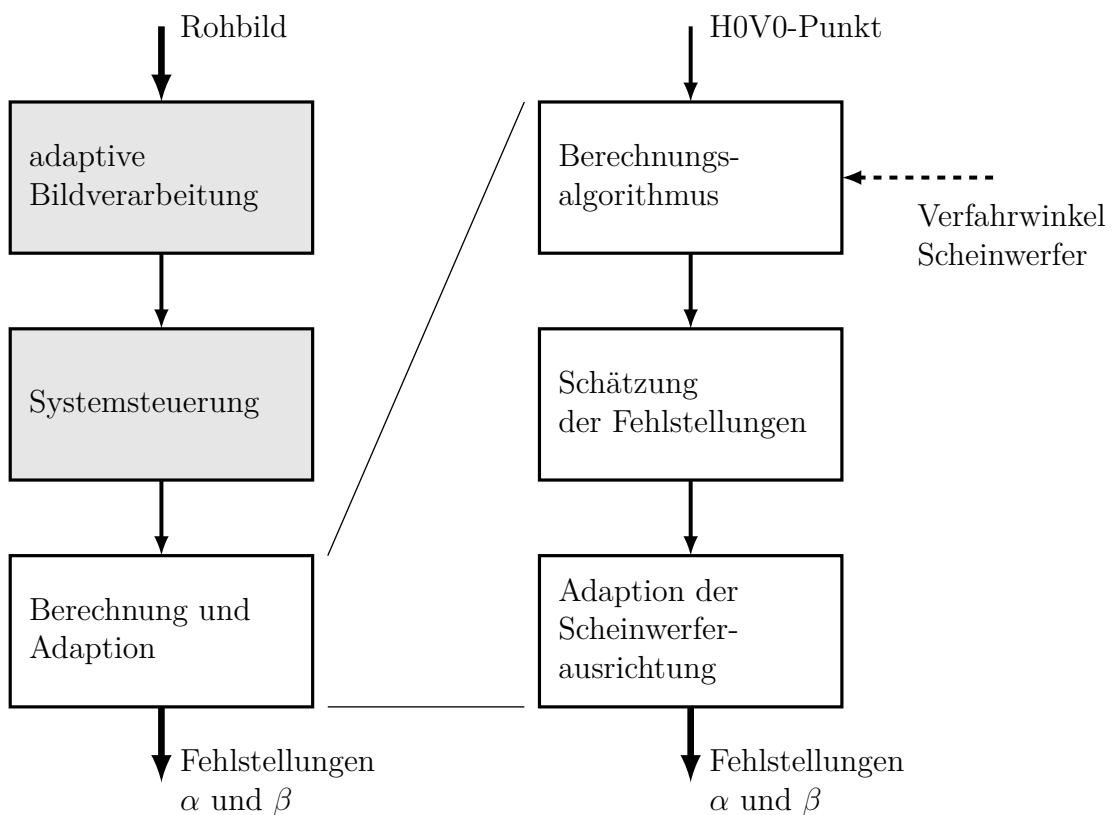


Abbildung 5.14: Ablauf der Berechnung und der Adaption

5.3.1 Modellansätze und Berechnungsverfahren

Die Überlegungen zu den Drehsystemen und dem Berechnungsverfahren aus Kapitel 4 basieren auf idealisierten Annahmen. Im nachfolgenden Abschnitt werden weitere Ansätze zur Beschreibung der Fehlstellungen ergänzt. Die Anordnung der Drehmatrizen aus Abschnitt 4.3.1, Gleichung (4.25), kann explizit gelöst werden. Die Änderung der charakteristischen Punkte und die Beschreibung der Fehlstellungen werden getrennt voneinander betrachtet. Eine grundlegende Änderung der Drehmatrizenanordnung führt zu veränderten Modell- und Lösungsansätzen, die nachfolgend dargestellt werden.

Modellansätze: Der Modellansatz 1 umfasst die grundlegenden Annahmen aus Kapitel 4 und erweitert die Drehmatrizenkombinationen um drei weitere Varianten, Gleichungen (5.11), (5.12), (5.13) und (5.14).

Modellansatz 1

$$\vec{p}_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.11)$$

$$\vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.12)$$

$$\vec{p}''_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.13)$$

$$\vec{p}'''_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.14)$$

Nach Angaben von *von Hoffmann* [124] ist ein Großteil der Hauptscheinwerfer, die das Kurvenlicht und die Leuchtweitenregulierung mittels Stellmotoren umsetzen, in ihrer y-Achse ortsfest und in ihrer z-Achse entsprechend variabel. In diesem Kontext ist die Beschreibung der Scheinwerferausrichtung unter Berücksichtigung der Fehlstellungen den Gleichungen (5.12) und (5.13) zu entnehmen. Bei Scheinwerfersystemen mit ortsfester z-Achse werden die Gleichungen (5.11) und (5.14) angenommen. Die Fehlstellungen haben nach diesem Ansatz keinen Einfluss auf die Lage und die Orientierung des Drehsystems im Scheinwerfer. Im Modellansatz 1 beschreiben die Fehlstellungen näherungsweise die Verdrehung des Scheinwerfers in Relation zum Fahrzeug. Eine mechanische Grundeinstellung über die Einstellschrauben am Scheinwerfer verändert allerdings das Drehsystem im Scheinwerfer. Unter Berücksichtigung dieser mechanischen Grundeinstellung durch die Module des Scheinwerfers, zeigt dieser Ansatz Schwächen, da die Beschreibung der Verfahrenswinkel diese Veränderung nicht berücksichtigt. Unter dem Gesichtspunkt kleiner Winkel ist der Ansatz dennoch anwendbar und bietet die Möglichkeit einer expliziten Lösung, siehe hierzu Anhang A.1.1.

Im Modellansatz 2 wird die Annahme getroffen, dass die Fehlstellungen des Scheinwerfers unbekannte Offset-Werte der Verfahrenswinkel sind. Die Drehmatrizen der Verfahrenswinkel und der Fehlstellungen werden in diesem Fall kombiniert, Gleichungen (5.15) und (5.16). Die Fehlstellungen des Scheinwerfers sind durch identische Verfahrenswinkel mit gedrehten Vorzeichen korrigierbar. Auch bei diesem Ansatz ist das

Drehsystem der Verfahrenswinkel unabhängig von den Fehlstellungen. Ein Eingriff im Sinne der mechanischen Grundeinstellung kann auch hier nicht abgebildet werden.

Modellansatz 2

$$\vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = \underbrace{D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha)}_{D_{y,\text{SW}}(\theta_p+\beta) \cdot D_{z,\text{SW}}(\phi_p+\alpha)} \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.15)$$

$$\vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = \underbrace{D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot D_{y,\text{SW}}(\beta)}_{D_{z,\text{SW}}(\phi_p+\alpha) \cdot D_{y,\text{SW}}(\theta_p+\beta)} \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.16)$$

Eine vergleichbare Lösung wie in Abschnitt 4.3.2, ist durch den kombinierten Ansatz nicht mehr möglich. Im Anhang A.1.2 wird auf Basis von Gleichung (5.15) der veränderte Lösungsweg aufgezeigt. Die Darstellung dieses Ansatzes dient lediglich der Vollständigkeit. Im weiteren Verlauf wird darauf nicht mehr eingegangen.

Unter Berücksichtigung der mechanischen Einstellung des Scheinwerfers in horizontaler und vertikaler Richtung und unter der Annahme, dass die mechanische Grundeinstellung über die Drehachsen der Stellmotoren erfolgt, werden im Modellansatz 3 die Änderungen des charakteristischen Punkts und die Beschreibung der Fehlstellungen wieder getrennt betrachtet. Die von *von Hoffmann* aufgestellte Drehmatrixkombination wird durch die Beschreibung der Fehlstellungen erweitert. Im Vergleich zu den bereits vorgestellten Gleichungen (5.11), (5.12), (5.13) und (5.14), werden die Drehmatrizen, die die Fehlstellungen beschreiben, vor die Drehmatrizen der Verfahrenswinkel gestellt. Angenommen wird, dass im Scheinwerferkoordinatensystem durch die Fehlstellungen die Orientierung des Drehsystems für die Verfahrenswinkel geändert wird. Die ableitbaren Ausführungen sind den Gleichungen (5.17), (5.18), (5.19) und (5.20) zu entnehmen.

Modellansatz 3

$$\vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.17)$$

$$\vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.18)$$

$$\vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.19)$$

$$\vec{p}'_{\text{SW}}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) = D_{y,\text{SW}}(\beta) \cdot D_{z,\text{SW}}(\alpha) \cdot D_{z,\text{SW}}(\phi_p) \cdot D_{y,\text{SW}}(\theta_p) \cdot \vec{p}_{0,\text{SW}} \quad (5.20)$$

Für diese Gleichungen sind keine expliziten Lösungswege absehbar. Eine Lösung über das *Newton-Verfahren* wird daher verwendet, siehe Anhang A.2.

Im Modellansatz 1 ist der Scheinwerfer ein abgeschlossenes System, der p charakteristische Richtungsvektoren für die aktive Triangulation zur Verfügung stellt. Dieses Bündel an Richtungsstrahlen ist durch die Fehlstellungen (α und β) verdreht. Der Modellansatz 3 basiert auf den beweglichen Modulen im Scheinwerfer, die durch

die Fehlstellungen (α und β) verstellt werden, wodurch sich das Drehsystem für die Verfahrenspositionen ändert. In Kapitel 6, Abschnitt 6.3.1, werden die beiden Ansätze miteinander verglichen.

Berechnungsverfahren: Die eingeführten Modellansätze 1 und 2 lassen sich über eine explizite Lösung berechnen. Beispielhaft sei an dieser Stelle auf die Lösung der Gleichung (5.11) in Abschnitt 4.3.2 verwiesen. Der Modellansatz 3 ist nicht explizit lösbar. Folglich wird eine Näherung über das *Newton-Verfahren*, Gleichung (5.21), für Gleichung (5.19) durchgeführt.

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - \left(J_{\vec{f}}(\vec{x}_k) \right)^{-1} \cdot \vec{f}(\vec{x}_k) \quad (5.21)$$

Der verwendete funktionale Zusammenhang $\vec{F}(\vec{x})$ ist nach Abschnitt 4.3.2 mit $\vec{x} = (\alpha, \beta, s_1, s_2, r_1, r_2)^T$ wie folgt zu definieren¹⁶:

$$\vec{F}(\vec{x}) = \begin{pmatrix} s_1 \cdot D_y(\beta) D_z(\alpha) D_y(\theta_1) D_z(\phi_1) \vec{p}_0 - r_1 \cdot \vec{k}_{n_1, m_1} - (\vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1}) \\ s_2 \cdot D_y(\beta) D_z(\alpha) D_y(\theta_2) D_z(\phi_2) \vec{p}_0 - r_2 \cdot \vec{k}_{n_2, m_2} - (\vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1}) \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

Die *Jacobi-Matrix* lässt sich nach Gleichung (A.30), Anhang A.2.2, berechnen.

$$J_{\vec{F}}(\vec{x}) = \begin{pmatrix} (s_1 D_y(\beta) D'_z(\alpha) D_y(\theta_1) D_z(\phi_1) \vec{p}_0)^T & (s_2 D_y(\beta) D'_z(\alpha) D_y(\theta_2) D_z(\phi_2) \vec{p}_0)^T \\ (s_1 D'_y(\beta) D_z(\alpha) D_y(\theta_1) D_z(\phi_1) \vec{p}_0)^T & (s_2 D'_y(\beta) D_z(\alpha) D_y(\theta_2) D_z(\phi_2) \vec{p}_0)^T \\ (D_y(\beta) D_z(\alpha) D_y(\theta_1) D_z(\phi_1) \vec{p}_0)^T & (\vec{0})^T \\ (\vec{0})^T & (D_y(\beta) D_z(\alpha) D_y(\theta_2) D_z(\phi_2) \vec{p}_0)^T \\ (-\vec{k}_{n_1, m_1})^T & (\vec{0})^T \\ (\vec{0})^T & (-\vec{k}_{n_2, m_2})^T \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

Der Startvektor \vec{x}_0 für die Iteration wird zu $\vec{x}_0 = (0, 0, 8, 8, 9, 9)^T$ gewählt. Es wird die Annahme getroffen, dass die horizontale und die vertikale Fehlstellung im Wertebereich um $\alpha = 0^\circ$ und $\beta = 0^\circ$ liegen. Aus Untersuchungen des Kalibriersystem im Labor und im Verkehrsraum, Abschnitt 6.3, sind Abstände zwischen Projektionsfläche und Scheinwerfer von ungefähr 8 m ermittelbar. Für die Entfernung zwischen Kamera und Projektionsfläche werden 9 m angenommen [141]. Die Datenanalysen zeigen, dass eine hinreichende Konvergenz nach bereits fünf Iterationsschritten erfolgt¹⁷.

¹⁶Die Größe $\vec{p}_{0,sw}$ wird vereinfacht durch \vec{p}_0 ausgedrückt.

¹⁷Die geschätzte Entfernung ändert sich nach fünf Iterationsschritten nur noch im Bereich von 10^{-2} , die Winkel im Bereich von 10^{-5} [141].

5.3.2 Schätzung der Scheinwerferfehlstellung

In diesem Abschnitt wird die Schätzung der Kalibrierergebnisse (α und β) aus den Einzelergebnissen (α_n und β_n) näher betrachtet. Die Einzelergebnisse gehen aus der Anwendung des Berechnungsverfahrens für jeweils zwei unabhängige charakteristische Punkte hervor, Abschnitte 4.3.2 und 5.3.1. Grundlegend wird in Abschnitt 4.4.2 ein Median benutzt, um das Kalibrierergebnis aus den $N(p, w) = \frac{w \cdot p \cdot (p-1)}{2}$ Einzelergebnispaaren (α_n und β_n) zu bestimmen.

Eine reine Median-Schätzung aus der ungefilterten Menge der errechneten Einzelergebnisse birgt die Gefahr, dass das Endergebnis aufgrund von Ausreißern verfälscht wird. Nachfolgend wird die Datenmenge \mathbf{X} der Einzelergebnisse X_n standardisiert¹⁸. Bei der Bestimmung der Scheinwerferfehlstellungen (α und β) muss damit gerechnet werden, dass sich die gesuchten Ergebnisse verändern. Eine Standardisierung erzeugt eine Verteilung um den Wert null und ermöglicht dadurch eine Bandpassfilterung der Werte, die auf alle Fehlstellungen angewendet werden kann. Die Filterung reduziert die Ausreißer, die maßgeblich das Endergebnis beeinflussen. Die Transformation für die Standardisierung wird nach Gleichung (5.24) mit $\mu(\mathbf{X})$ als Stichprobenmittelwert und $S(\mathbf{X})$ als Stichprobenstandardabweichung der Datenmenge \mathbf{X} angenommen und ist als z-Score bekannt [34].

$$Z_{z\text{-Score}}(X_n) = \frac{X_n - \mu(\mathbf{X})}{S(\mathbf{X})} \quad (5.24)$$

Allerdings erweisen sich der Mittelwert und die Standardabweichung als anfällig gegenüber Ausreißern, wohingegen der *Median* $Med(\mathbf{X})$ und der *Median der absoluten Abweichungen*¹⁹ $MAD(\mathbf{X})$ robuster sind [34]. Der resultierende z-Score ergibt sich entsprechend zu:

$$Z_{z\text{-Score}}(X_n) = \frac{X_n - Med(\mathbf{X})}{MAD(\mathbf{X})} \quad (5.25)$$

Die Bandpassfilterung wird für die transformierten Werte $Z_{z\text{-Score}}(X_n)$ ausgeführt. Hierfür wird ein Filterbereich von $\pm 3,25$ angenommen [141]. Die gefilterten Daten werden rücktransformiert und bilden die Wertemenge \mathbf{X}' , aus der die Kalibrierergebnisse bestimmt werden. In Abbildung 5.15 ist ein Vergleich der ungefilterten und der gefilterten Einzelergebnisse der horizontalen Fehlstellung α_n dargestellt. Die Filterung auf Basis der Standardisierung verringert die Datenmenge, indem markante Ausreißer eliminiert werden. Abbildung 5.16 zeigt das resultierende Histogramm der horizontalen Einzelergebnisse α_n , woraus über einen Median das horizontale Kalibrierergebnis α bestimmt wird²⁰. Für das angeführte Beispiel ergibt sich eine horizontale Fehlstellung von $\alpha = -0,0835^\circ$.

¹⁸ X_n ist ein Tupel aus den Einzelergebnissen α_n und β_n .

¹⁹ $MAD(\mathbf{X}) := Med(|X_n - Med(\mathbf{X})|)_{i=1}^N$ mit der Menge \mathbf{X} aller Einzelergebnisse und $X_n \in \mathbf{X}$, vergleiche [34].

²⁰Die Aussagen können vollständig auf die vertikale Fehlstellung β übertragen werden.

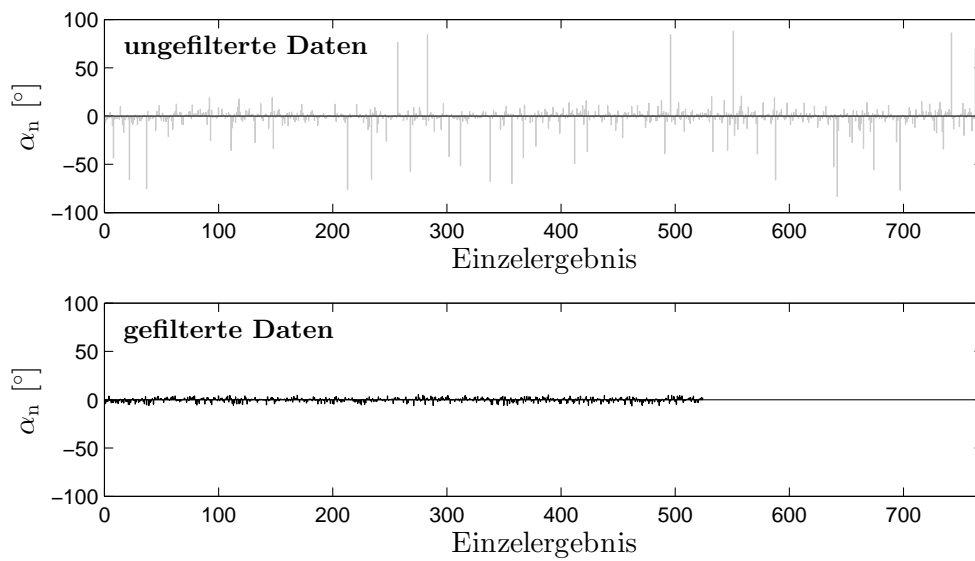


Abbildung 5.15: Vergleich zwischen ungefilterten und gefilterten Daten für die Einzelergebnisse der horizontalen Fehlstellungen α_n

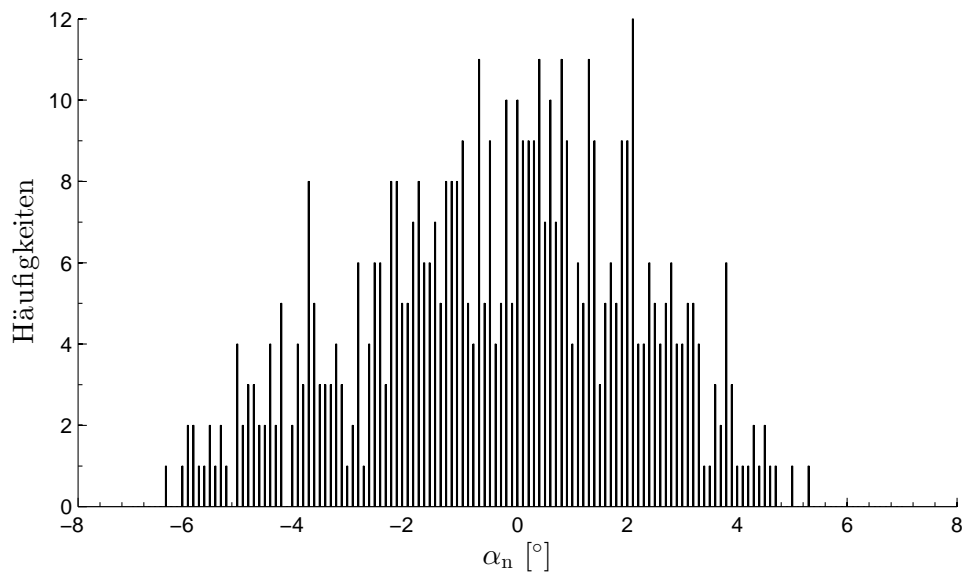


Abbildung 5.16: Histogramm der gefilterten Einzelergebnisse der horizontalen Fehlstellungen α_n

5.3.3 Adaption der Scheinwerferausrichtung

Der Abschluss des Systemablaufs der automatisierten Scheinwerfereinstellung sieht eine Adaption der Scheinwerferausrichtung auf Basis der bestimmten horizontalen und vertikalen Fehlstellungen des linken und rechten Scheinwerfers vor. Es wird zwischen zwei Korrekturmöglichkeiten unterschieden: eine aktive Nachregelung und eine optische Kopplung.

Im Fall einer Korrektur der Hauptscheinwerfer über vorhandenen Stellmotoren (ALWR, Abschnitt 2.2.1, und DKL, Abschnitt 2.2.2) wird der Scheinwerfer entsprechend den Korrekturwerten verfahren. Das Abblendlicht ist hinsichtlich der vorgeschriebenen Ausrichtung korrekt eingestellt, Abbildung 5.17. Die durch den Lichtalgorithmus angeforderten Verfahrenswinkel werden durch die Korrekturwerte ergänzt. Aus mathematischer Sicht entsprechen die Korrekturwinkel den berechneten Fehlstellungen mit gedrehtem Vorzeichen. Zusätzlich ist die Orientierung der Kamera im globalen Koordinatensystem zu berücksichtigen, da die Fehlstellung im Kamerakoordinatensystem berechnet wird. Die bekannten Einflussfaktoren sind hierbei der Verbau der Kamera im Fahrzeug und die optische Kalibrierung des Systems in der Produktionslinie des Automobilherstellers.



Abbildung 5.17: Darstellung der aktiven Nachregelung eines fehlgestellten rechten Scheinwerfers nach (Bild links) und vor (Bild rechts) der Kalibrierung

Im Zuge einer optischen Kopplung werden die Korrekturwerte in den Lichtalgorithmus integriert. Die Ausrichtung des Scheinwerfers wird im Abblendlicht nicht verändert. Die bekannte Abstrahlcharakteristik eines blendfreien Fernlichtsystems, Abschnitt 2.3.4, wird durch die Korrekturwerte gedreht. Die durch die Kamera detektierten Objekte werden aus dem Kamerakoordinatensystem in das gedrehte Scheinwerferkoordinatensystem transformiert. Die Drehung mittels der Korrekturwerte macht eine fehlerfreie Transformation der Objekte ins Scheinwerferkoordinatensystem möglich. Der Gegenverkehr kann trotz falsch eingestellter Scheinwerfer korrekt entblendet werden, Abbildung 5.18.

Der Zeitpunkt der Übernahme der Korrekturwerte erfolgt nach einem Zündungswechsel. Sollte keine aktuellere Fehlstellung vorliegen, werden die bekannten Korrekturwerte verwendet. Der Winkelbereich für die aktive Nachregelung wird aus den

maximalen vertikalen Verfahrenswinkeln des Scheinwerfers mit $\pm 3^\circ$ hergeleitet, Abschnitt 4.4.2. Für die Nutzung der ALWR ist nach den Aussagen von *Huhn* und *Lehnert* ein durchschnittlicher Regelbereich der Nickwinkel zwischen $\pm 1,6^\circ$ ableitbar, Abschnitt 2.2.1. Für die Durchführung der automatisierten Scheinwerfereinstellung ist ein Verfahrenswinkelbereich von $\pm 1,5^\circ$ vorzuhalten, Abschnitt 5.2.3. Da die ALWR und die Kalibrierung nicht gleichzeitig aktiv sind, stehen $\pm 1,4^\circ$ für die aktive Nachregelung der vertikalen Fehlstellung zur Verfügung. Für die Korrektur der horizontalen Fehlstellung wird der gleiche Winkelbereich genutzt. Erfasste Daten zur Einstellung des Scheinwerfers werden bei einer unvollständigen Kalibrierung nach 4.000 km wieder gelöscht, da nach dieser Fahrleistung auf Basis der erhobenen Daten in Abschnitt 3.1.3 von einer Veränderung der Scheinwerferausrichtung ausgegangen werden kann. Ebenso sind nach einer Einstellung der Scheinwerfer im Zuge eines Werkstattaufenthalts die gespeicherten Daten zu verwerfen.

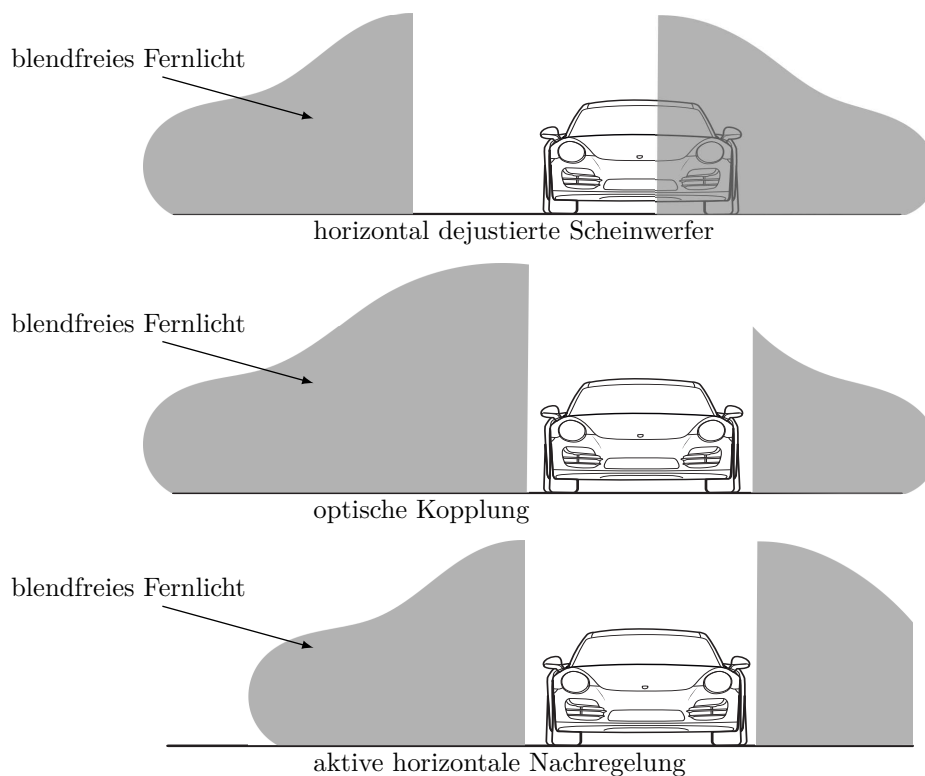


Abbildung 5.18: Schematische Darstellung der optischen Kopplung und der aktiven Nachregelung bei horizontal dejustierten Scheinwerfern

6 Experimentelle Untersuchungen

Die Grundlage für die experimentelle Betrachtung der automatisierten Scheinwerfereinstellung ist die prototypische Umsetzung des Systems, Abschnitt 6.1. In ersten Voruntersuchungen wird die HDG unter den Gesichtspunkten der geometrischen Orientierung und der subjektiven Wahrnehmung betrachtet, Abschnitt 6.2. Mithilfe der aufgebauten Versuchsträger und unter Berücksichtigung der Voruntersuchungen zur HDG werden die Kalibrierergebnisse der automatisierten Scheinwerfereinstellung für einen Serienscheinwerfer, Abschnitt 6.3, und einen Prototypenscheinwerfer, Abschnitt 6.4, validiert. Abschließend werden die experimentell ermittelten Erkenntnisse diskutiert, Abschnitt 6.5.

6.1 Prototypische Integration

Die automatisierte Scheinwerfereinstellung wird prototypisch in zwei Versuchsträgern integriert, deren grundlegender Aufbau identisch ist, Abschnitt 6.1.1. Die genutzten Scheinwerfersysteme werden hierfür technisch nicht verändert, Abschnitt 6.1.2. Für die Validierung der Kalibrierergebnisse wird ein spezielles Referenzmessverfahren entwickelt, Abschnitt 6.1.3.

6.1.1 Versuchsträger

Bei den Versuchsträgern handelt es um einen Porsche Panamera (Baujahr 2013) mit einem Prototypenscheinwerfer und einen Porsche 911 (Baujahr 2011) mit einem Serienscheinwerfer. Beide Fahrzeuge werden mit der vorgestellten automatisierten Scheinwerfereinstellung ausgestattet, um die flexible Anwendbarkeit der Kalibrierung für die unterschiedlichen Scheinwerfersysteme, Abschnitt 6.1.2, zu zeigen und zu untersuchen. Die Serienfahrzeuge werden jeweils mit einer Fahrerassistentenkamera und einer Entwicklungsumgebung ausgestattet, Anhang D.1. Die Entwicklungsumgebung ist auf einem Industrie-PC lauffähig und bietet die Möglichkeit, direkt auf das Rohbild der Kamera zuzugreifen. Der in Kapitel 5 dargestellte Systemablauf der automatisierten Scheinwerfereinstellung ist in der Entwicklungsumgebung umgesetzt. Die Position der nachgerüsteten Kamera wird relativ zur Anbauposition der beiden Scheinwerfer bestimmt.

Die Steuerung der Hauptscheinwerfer erfolgt in beiden Fahrzeugen durch ein Lichtsteuergerät, das über eine CAN-Verbindung mit den Scheinwerfern verbunden ist. Die Kalibrierung erfordert eine definierte Verlagerung des Lichtbilds. Folglich ist

dem Lichtsteuergerät die Kontrolle des Scheinwerfers während der Kalibrierung zu entziehen. In den Versuchsträgern wird daher zwischen Scheinwerfer und Steuergerät ein CANLog, Anhang D.3, eingebaut. Dieser ermöglicht während der Kalibrierung eine Trennung zwischen dem Steuergerät und den beiden Scheinwerfern und lässt eine Funktionssteuerung durch das Kalibriersystem über einen Private-CAN zu. Gleichzeitig werden die vom Scheinwerfer zum Steuergerät gesendeten CAN-Signale weiterhin zum Lichtsteuergerät durchgeroutet, wodurch überflüssige Fehlermeldungen des Fahrzeugs ausbleiben. Zusätzlich lässt sich durch den CANLog der Einsatz des Kalibriersystems durch vordefinierte Fahrzeugparameter steuern. Diese werden über den Fahrzeug-CAN bezogen, siehe hierzu Abschnitt 5.2.2. Die Integration der automatisierten Scheinwerfereinstellung in die Elektronik-Architektur des Porsche Panameras ist vereinfacht in Abbildung 6.1 dargestellt. Die Elektronik-Architektur für den Versuchsträger Porsche 911 ist identisch.

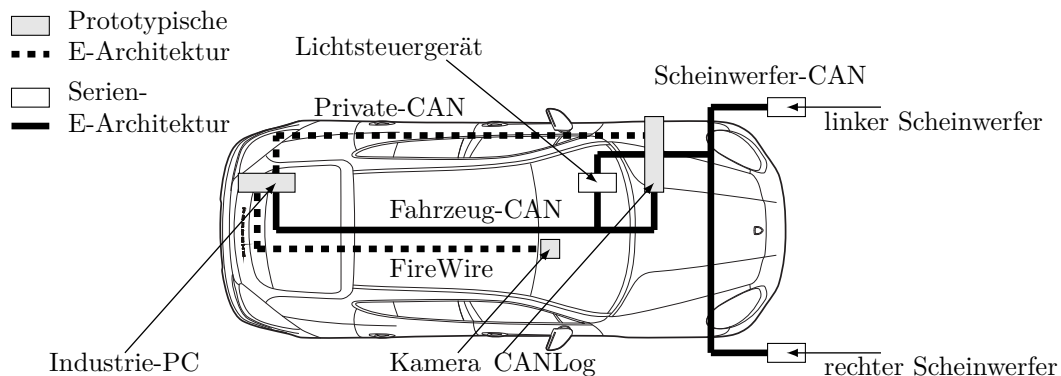


Abbildung 6.1: Darstellung der Elektronik-Architektur (E-Architektur) des Versuchsträgers Panamera

Parallel zum Systemablauf werden für die Validierung alle Eingangsgrößen gespeichert, die zur Bestimmung der Kalibrierergebnisse beitragen, Anhang C.2. Eine vollständige Rekonstruktion der jeweiligen Kalibrierung ist dadurch offline möglich.

6.1.2 Scheinwerfersysteme

Im Vergleich zu den Onlinekalibrierverfahren, die eine Licht- bzw. Schattenmarkierung benötigen, Abschnitt 3.1.2, ist bei der HDG-basierten aktiven Triangulation keine Veränderung am Scheinwerfer notwendig.

Für die Kalibrierung wird der Serien-LED-Scheinwerfer des Porsche 911 und der Prototypenscheinwerfer des Porsche Panamera verwendet. Der Serien-LED-Scheinwerfer¹ hat zwei Module, die jeweils beide ein Projektionssystem nutzen, Abschnitt 2.1.2. Das Spot-Modul erzeugt die Abblendlichtverteilung sowie die adaptiven Lichtverteilungen und die Fernlichtverteilung. Das Vorfeld-Modul generiert das Vorfeld für alle Lichtverteilungen. Die automatische Leuchtweitenregulierung,

¹Porsche Dynamic Light System +, LED-Scheinwerfer, Porsche 911 (991).

Abschnitt 2.2.1, hebt und senkt beide Module. Die Stellmotorik für das dynamische Kurvenlicht, Abschnitt 2.2.2, dreht das Spot-Modul nach links und rechts. Das Vorfeld-Modul ist oberhalb des Spot-Moduls im Scheinwerfer integriert und hat in Relation zur Fahrzeuginnenachse einen größeren Nickwinkel. Bis zu einer Entfernung² von 10 m ist die HDG des Vorfeld-Moduls dadurch oberhalb der HDG des Spot-Moduls. Für die automatisierte Scheinwerfereinstellung wird die HDG des Abblendlichts verwendet. Der bekannte H0V0-Punkt, als Schnittpunkt zwischen der Horizontalen und dem Anstieg auf der rechten Seite der HDG, Abschnitt 2.1.1, wird als charakteristischer Punkt definiert. Weitere Punkte werden durch die Verlagerung des H0V0-Punkts über das dynamische Kurvenlicht und die automatische Leuchtweitenregulierung erzeugt.

Der Prototypenscheinwerfer ist ein Matrixscheinwerfer, Abschnitt 2.3.4. Das Projektionssystem des Scheinwerfers bildet einzelne LED-Segmente ab, die die Lichtverteilung erzeugen. Im Vergleich zum Serien-LED-Scheinwerfer mit einem 45°-Knick an der HDG wird bei dem Prototypenscheinwerfer ein 90°-Knick realisiert. Dieser Knick ist durch das Aktivieren bzw. Deaktivieren der einzelnen LED-Segmente in seiner geometrischen Orientierung veränderbar und damit als charakteristischer Punkt für das Kalibrierverfahren nutzbar. Im Prototypenscheinwerfer ist keine nutzbare Stellmotorik verbaut.

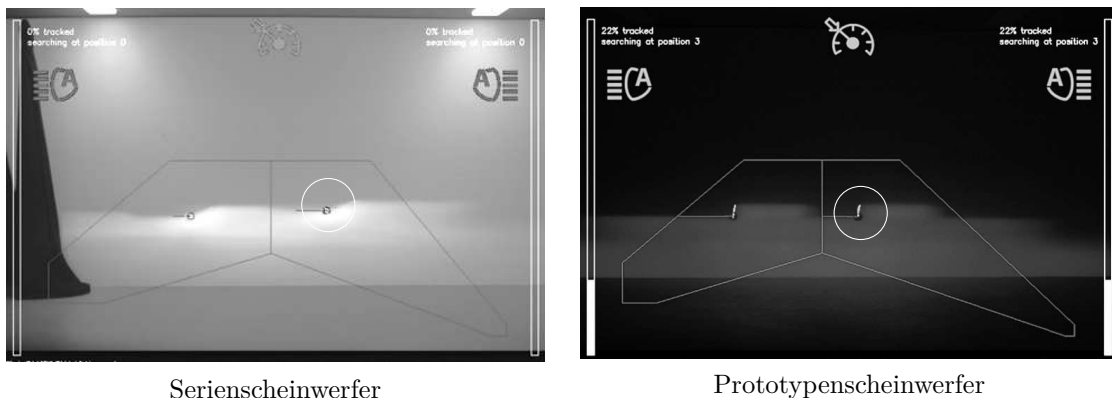


Abbildung 6.2: Darstellung der HDG des Serienscheinwerfers (links, Kreis) und des Prototypenscheinwerfers (rechts, Kreis), aufgenommen mit der Fahrerassistenzkamera

In Abbildung 6.2 sind die Lichtverteilungen beider Scheinwerfer auf einer Projektionsfläche dargestellt. Die Ansteuerung der Scheinwerfer erfolgt in beiden Fällen über den Private-CAN durch den Industrie-PC, Abbildung 6.1.

6.1.3 Referenzmessverfahren

Das Referenzmessverfahren wird in die Versuchsträger integriert, um eine Überprüfung der berechneten Scheinwerferfehlstellungen zu ermöglichen, vergleiche [154]. Für das Messverfahren, Abbildung 6.4, ist eine ebene Projektionsfläche notwendig,

²Die Angabe beschreibt die Distanz zwischen Scheinwerfer und Projektionsfläche.

deren geometrische Orientierung relativ zum Fahrzeug erfasst wird. Hierzu wird ein Abstandslaser verwendet, der mittels eines Aufsatzes an der jeweiligen Radnabe der Hinterräder fest mit der Fahrzeugkarosserie verbunden wird. Über eine Distanzmessung an dem linken und dem rechten Hinterrad ist der Abstand, x_{p_l} und x_{p_r} , zur Projektionsfläche und die Verdrehung der Projektionsfläche vor dem Fahrzeug durch Kenntnis der Hinterachsweite $\Delta y_{\text{Hinterachse}}$ bestimmbar. Der Ursprung des globalen Koordinatensystems wird in Höhe des linken Hinterrades auf den Laborboden gelegt. Die Laborbedingungen rechtfertigen die Annahme, dass die Fahrzeuginnenachse parallel zum Boden und senkrecht zur Projektionsfläche ist. Unter diesen Voraussetzungen ist das Geometriemodell, Abschnitt 4.2, zwischen Fahrzeug und Projektionsfläche vollständig definiert. Der Abstand zwischen Radnabe und Boden wird mit z_{ph} beschrieben. Die Verdrehung der Wand vor dem Fahrzeug nimmt den Winkelwert $\epsilon_2 = \arctan\left(\frac{x_{p_r} - x_{p_l}}{\Delta y_{\text{Hinterachse}}}\right)$ an.

$$\vec{E}_p = \begin{pmatrix} x_{p_l} \\ 0 \\ z_{\text{ph}} \end{pmatrix} + u \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + v \cdot D_z(\epsilon_2) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Gleichung (6.1) zeigt die aus Abschnitt 4.2.1 parametrisierte Ebenengleichung, Gleichung (4.12), für das Referenzmessverfahren. Durch die bekannten Geometriebeziehungen zwischen Fahrzeug und Projektionsfläche und durch die Kenntnis der relativen Lagen zwischen der Kamera und den Scheinwerfern im Fahrzeug, Abschnitt 6.1.1, ist es möglich, einer Pixelposition auf dem Kamerabild eine globale Position im Raum zuzuordnen. Die globale Position kann aus der Perspektive der beiden Scheinwerfer betrachtet werden. Für die Abbildung der HDG bedeutet dies eine Bestimmung der horizontalen und vertikalen Fehlstellung bei bekannten Verfahrenswinkeln. Die Berechnungen aus den Abschnitten 4.2.2 und 4.2.3 sind aus der Perspektive des jeweiligen Scheinwerfers auszuführen.

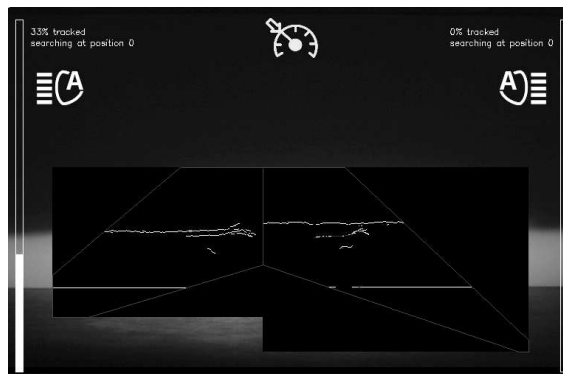


Abbildung 6.3: Kantendarstellung der HDG in den ROIs auf dem Fahrerassistenzkamera-bild

Die Pixelposition des H0V0-Punkts wird subjektiv aus dem Kantenbild, Abbildung 6.3, bestimmt, wodurch über das Referenzmessverfahren die Soll-Fehlstellungen der Hauptscheinwerfer ableitbar sind. Das genutzte Geometriemodell entspricht den Ausführungen in Abschnitt 4.3.1. Die übrigen Modellansätze aus Abschnitt 5.3.1 können aufgrund der kleinen Winkel an dieser Stelle vernachlässigt werden.

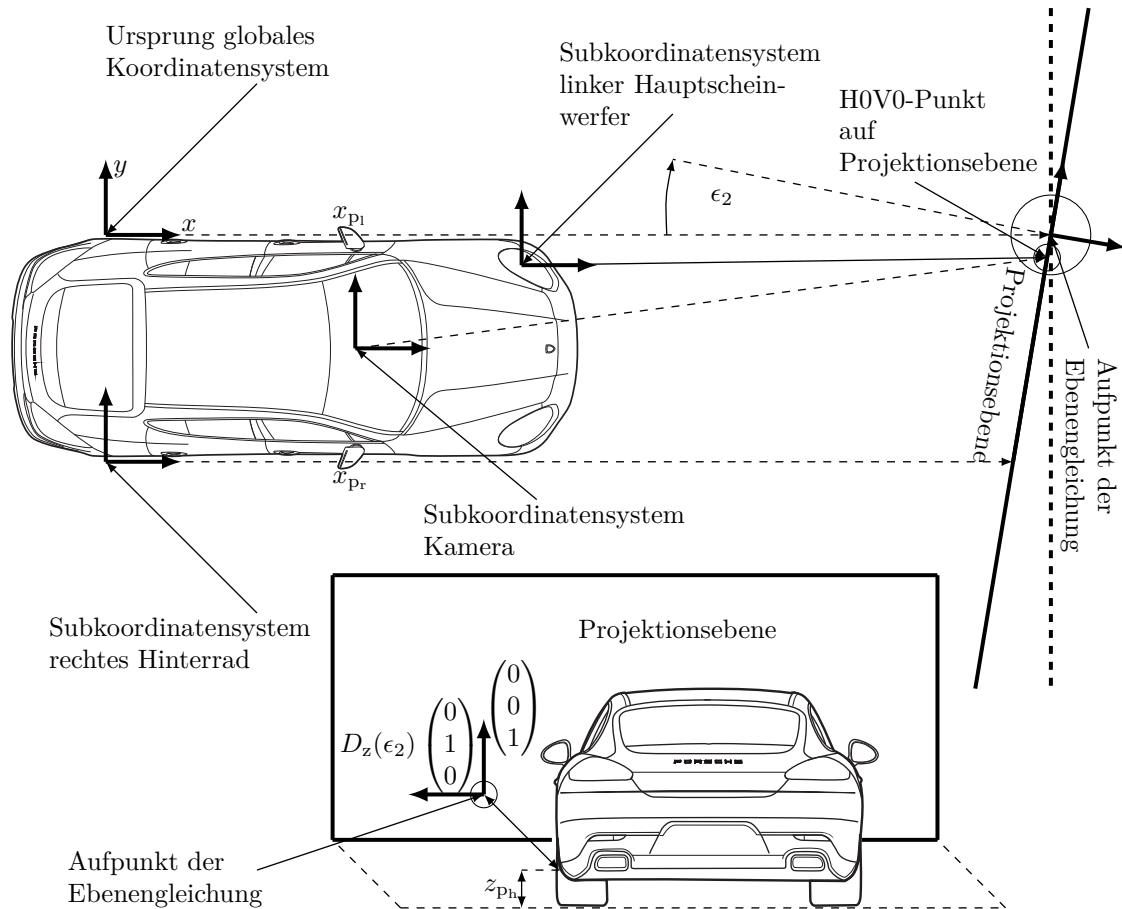


Abbildung 6.4: Darstellung des Referenzmessverfahrens zur Bestimmung der Referenz-Fehlstellung der Hauptscheinwerfer

Für den Versuchsträger mit den Serienscheinwerfern beträgt der Abstand zwischen Hinterachse und Scheinwerfer ungefähr 3 m, für den Versuchsträger mit den Prototypenscheinwerfern ist der Abstand ca. 3,5 m.

6.2 Voruntersuchungen zur Hell-Dunkel-Grenze

Das aktive Triangulationsverfahren nutzt für die Bestimmung der geometrischen Orientierung des Scheinwerfers den H0V0-Punkt der HDG. Folglich ist eine genauere Untersuchung der HDG des Serienscheinwerfers von Bedeutung. Auf Basis einer Probandenstudie wird die subjektive Wahrnehmung der HDG durch den Menschen in vertikaler und horizontaler Richtung auf einer Projektionsfläche untersucht, Abschnitt 6.2.1. Darauf aufbauend wird die detektierte Winkellage der durch die Fahrerassistenzkamera bestimmten HDG beurteilt, Abschnitt 6.2.2. Ebenso wird die in der Literatur postulierte geometrische Verlagerung der HDG, Abschnitt 3.2.1, auf Basis der Entfernung zur Projektionsfläche untersucht und eine Maßnahme zur Detektion dieser Lageänderung beispielhaft vorgestellt, Abschnitt 6.2.3.

6.2.1 Einstelltoleranzen der visuell-manuellen Methode

Im Zuge der subjektiven Bewertung der geometrischen Lage der HDG werden 23 Probanden einer Studie unterzogen, in der der H0V0-Punkt einer HDG auf einer Projektionsfläche markiert werden soll. Ziel der Studie ist es, die Einstelltoleranzen für die visuell-manuelle Methode abzuleiten.

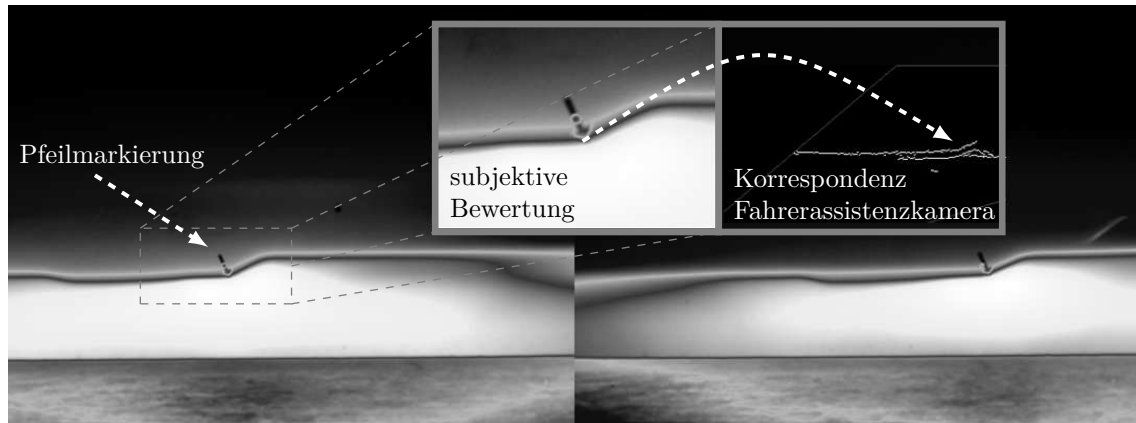


Abbildung 6.5: Erfassung der subjektiven Bewertung des H0V0-Punkts auf einem Leuchtdichtebild und Bestimmung der Ausrichtung auf dem Fahrerassistenzkamerabild

Das Fahrzeug wird in einer Entfernung von 10 m zwischen Scheinwerfer und Wand positioniert, wobei angenommen werden kann, dass die Fahrzeuglängsachse senkrecht zur Projektionsfläche steht, vergleiche Abbildung 6.4. Der Aufbau entspricht den Bedingungen, die bei einer manuellen Scheinwerfereinstellung gegeben sind, Abschnitt 2.4.1. Der Proband befindet sich während der Durchführung der Studie auf der Höhe des jeweiligen Hauptscheinwerfers, Anhang B.1.2. Eine magnetische Pfeilmarkierung wird per Zuruf auf der metallischen Projektionsfläche derart bewegt, dass der H0V0-Punkt der HDG mit der Pfeilspitze markiert wird, siehe Abbildung 6.5. Die Zusammensetzung der Probanden wird willkürlich gewählt³. Es wird lediglich darauf geachtet, dass keine schwerwiegenden Sehbehinderungen vorliegen. Kurz- und Weitsichtigkeit wird toleriert, sofern eine Brille oder Kontaktlinsen getragen werden.

Jeder Proband muss die HDG des linken und des rechten Scheinwerfer jeweils zweimal bewerten. Die erste Bewertung erfolgt im dunklen Lichtlabor⁴ zunächst für den linken Scheinwerfer und anschließend für den rechten Scheinwerfer. Der nichtbewertete Scheinwerfer wird jeweils abgedeckt. Die zweite Bewertung erfolgt im hellen Lichtlabor⁵ entsprechend der bereits beschriebenen Vorgehensweise. Der Wechsel der Umfeldbeleuchtung wird von *Flannagan et al.* als Einflussfaktor der subjektiven Bewertung gesehen und daher berücksichtigt, vergleiche Abschnitt 3.2.1. Zu Beginn

³19 Männer, 4 Frauen, 19 Probanden befassen sich beruflich mit der automobilen Beleuchtung.

⁴Das Labor ist bis auf das Scheinwerferlicht abgedunkelt.

⁵Die komplette Deckenbeleuchtung des Labors ist an.

der Untersuchung wird den Probanden die Aufgabe erläutert und eine Einführung in den charakteristischen Verlauf der HDG gegeben. Dies geschieht im dunklen Lichtlabor, um eine möglichst gute Dunkeladaptation⁶ zu erreichen.

Nach jeder erfolgten Bewertung wird die Pixelposition des Markierungspfeils auf der Fahrerassistenzkamera festgehalten, Abbildung 6.5, womit über das in Abschnitt 6.1.3 vorgestellte Referenzmessverfahren durch eine vorangegangene Messung der Distanz zwischen Hinterachse und Projektionsfläche die vertikale und horizontale Winkellage des vermuteten H0V0-Punkts bestimmt werden kann. Die Bewertung des zweiten Scheinwerfers dient der Referenz, da von lichttechnisch gleichwertigen Systemen ausgegangen wird.

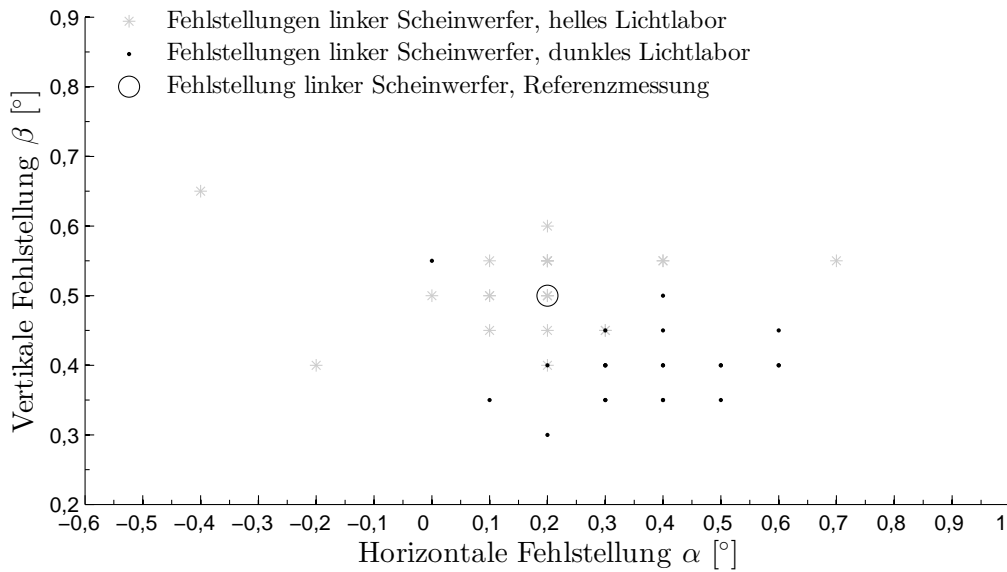


Abbildung 6.6: Ergebnisse der visuell-manuellen Einstellung für den linken Scheinwerfer in einer Entfernung von 10 m zwischen Scheinwerfer und Projektionsfläche

Die Probandenstudie zeigt, dass die Umfeldbeleuchtung das Beurteilungsergebnis im Hinblick auf den Mittelwert beeinflusst. In Abbildung 6.6 sind die Ergebnisse für den linken Scheinwerfer dargestellt. Für die vertikale Fehlstellung liegt durch den Wechsel zwischen den Umfeldbedingungen ein Winkelversatz von $\Delta\beta_{\text{hell,dunkel}} \approx 0,1^\circ$ vor. Die Standardabweichungen unterscheiden sich jedoch kaum, Tabelle 6.1, was die Aussagen *Flannagans et al.*, Abschnitt 3.2.1, mit Fokus auf die vertikale Einstellung des Hauptscheinwerfers bestätigen. Für die horizontale Fehlstellung wird ebenso die Konstanz der Standardabweichung hervorgehoben sowie eine geringfügige Veränderung der geometrischen Orientierung beobachtet.

Die Abbildung 6.7 zeigt alle 46 Bewertungsergebnisse für den linken Scheinwerfer und stellt nochmals den Wechsel zwischen den Umfeldbedingungen dar. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Referenzmessungen mit den jeweiligen Mittelwerten für die vertikalen und horizontalen Fehlstellungen verglichen.

⁶Die Dunkeladaptation erfolgt innerhalb von 30 min, vergleiche [14], die Helladaptation erfolgt in weniger als 1 min.

Tabelle 6.1: Ergebnisse der Probandenstudie

Szenarien mit je 23 Probanden	horizontale Fehlstellung α		vertikale Fehlstellung β	
	Standard- abweichung σ_α	Mittelwert μ_α	Standard- abweichung σ_β	Mittelwert μ_β
linker Scheinwerfer Lichtlabor hell	0,2066°	0,1783°	0,0607°	0,5130°
rechter Scheinwerfer Lichtlabor hell	0,1396°	0,2304°	0,0450°	0,5957°
linker Scheinwerfer Lichtlabor dunkel	0,1530°	0,3609°	0,0553°	0,3978°
rechter Scheinwerfer Lichtlabor dunkel	0,1356°	0,2261°	0,0446°	0,5196°
linker Scheinwerfer	0,2021°	0,2696°	0,0818°	0,4554°
rechter Scheinwerfer	0,1361°	0,2283°	0,0587°	0,5576°

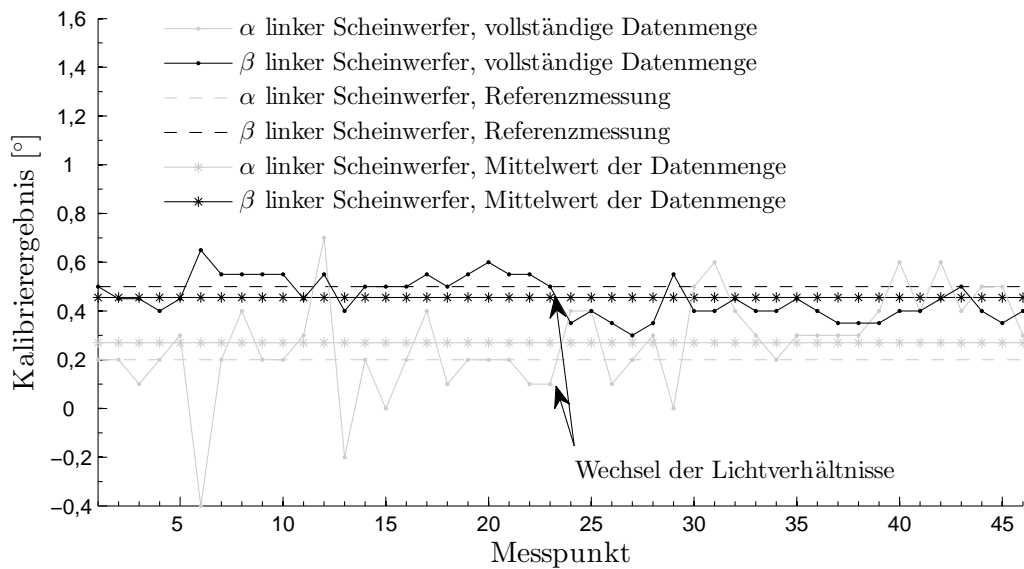


Abbildung 6.7: Vergleich der Referenzmessung mit den Messwerten für den linken Scheinwerfer bei der visuell-manuellen Einstellung

Für die horizontalen Fehlstellungen sind die Abweichungen zu den Referenzmessungen für beide Scheinwerfer im Mittel mit $\Delta\alpha_{\text{links,Studie,Referenz}} \approx 0,06^\circ$ und $\Delta\alpha_{\text{rechts,Studie,Referenz}} \approx 0,03^\circ$ auf einem Niveau mit den Abweichungen für die vertikalen Fehlstellungen mit $\Delta\beta_{\text{links,Studie,Referenz}} \approx 0,05^\circ$ und $\Delta\beta_{\text{rechts,Studie,Referenz}} \approx 0,05^\circ$. Die Ergebnisse geben einen Anhaltspunkt für die Einstelltoleranz von Hauptscheinwerfern auf Basis der visuell-manuellen Methode. Die entsprechenden Abbildungen für den rechten Scheinwerfer und weitere Leuchtdichteaufnahmen unter dunklen sowie hellen Umfeldbedingungen sind dem Anhang B.1.2 zu entnehmen.

6.2.2 Beurteilung der detektierten Hell-Dunkel-Grenze

Die Pixelpositionen der charakteristischen Punkte, die im Berechnungsverfahren, Abschnitt 4.3.2, zur Bestimmung der Fehlstellung notwendig sind, werden durch die Bildvorverarbeitung, den *Otsu-Canny-Algorithmus*, die *Hough-Transformation* und das dichtebasierte Klassifizierungsverfahren bestimmt, Abschnitte 5.1 und 5.2. Auf Basis dieser Pixelpositionen ist über das Referenzmessverfahren, Abschnitt 6.1.3, eine Zuordnung zu der horizontalen und der vertikalen Ausrichtung des H0V0-Punkts möglich.

Aus der Probandenstudie des vorangegangenen Abschnitts 6.2.1 sind die subjektiv bewerteten Winkellagen der HDG bekannt. Ein Vergleich mit der durch die Fahrerassistenzkamera detektierten geometrischen Orientierung des H0V0-Punkts zeigt, dass die kameraspezifische Bestimmung der HDG mit der subjektiven Bewertung der HDG in guter Näherung übereinstimmt, Abbildungen 6.7 und B.6. Unter Berücksichtigung der Bewertungsdaten bei dem Szenario helles Lichtlabor werden die besten Übereinstimmungen zu den Referenzmessungen erzielt.

Zur Untermauerung der ermittelten Ergebnisse wird eine zweite lichttechnische Bewertung der HDG vorgenommen. Durch ein indirektes Leuchtdichtemessverfahren mittels einer fest mit dem Fahrzeug verbundenen Leuchtdichtekamera besteht die Möglichkeit, den H0V0-Punkt auf dem Leuchtdichtebild zu bestimmen.

Prinzip der indirekten Leuchtdichtemessung: Eine Gradientenbestimmung zur Identifikation der vertikalen Lage der HDG eines Hauptscheinwerfers kann nach *Schmidt-Clausen* mittels der logarithmierten Werte der Beleuchtungsstärke auf der Projektionsfläche, auf der sich die HDG abbildet, umgesetzt werden, Abschnitt 3.2.1. Es werden die von *Totzauer* aufgegriffenen Zusammenhänge zur indirekten Leuchtdichtemessung [121] genutzt und entsprechend weitergeführt. Der nachfolgende Zusammenhang ist unter der Annahme einer lambertschen Reflexionseigenschaft der Projektionsfläche mit dem Einstrahlwinkel τ und dem Betrachtungswinkel ζ bekannt.

$$E_v = \frac{L_v \cdot \pi \cdot \Omega_0}{0,86 \cdot \rho_v(\tau, \zeta)} \quad (6.2)$$

$$E_v = L_v \cdot \underbrace{\frac{\pi \cdot \Omega_0}{0,86 \cdot \rho_v(\tau, \zeta)}}_{\rho_{v,\text{konst}}}$$

Die Logarithmierung der Beleuchtungsstärke führt zu:

$$\log(E_v) = \log(L_v) + \log(\rho_{v,\text{konst}}) \quad (6.3)$$

Der resultierende Reflexionsfaktor $\rho_v(\tau, \zeta)$ ist empirisch bestimmbar. Unter der Annahme eines konstanten Reflexionsfaktors⁷ wird Gleichung (6.2) entsprechend vereinfacht.

Die zur Gradientenbestimmung notwendige Differenzierung der logarithmierten Beleuchtungsstärkewerte $\log(E_v(\beta_{\text{LMK}}))$, Gleichung (6.3), ermöglicht eine vertikale Lagebestimmung der HDG mit den Leuchtdichtewerten.

$$G_v(\beta_{\text{LMK}}) = \frac{\log(L_v(\beta_{\text{LMK},n})) + \log(\rho_{v,\text{konst}}) - \log(L_v(\beta_{\text{LMK},n+1})) - \log(\rho_{v,\text{konst}})}{\beta_{\text{LMK},n} - \beta_{\text{LMK},n+1}}$$

$$G_v(\beta_{\text{LMK}}) = \frac{\log(L_v(\beta_{\text{LMK},n})) - \log(L_v(\beta_{\text{LMK},n+1}))}{\beta_{\text{LMK},n} - \beta_{\text{LMK},n+1}} \quad (6.4)$$

Die vertikale Lage der HDG verläuft durch den Wendepunkt des logarithmierten vertikalen Leuchtdichteverlaufs, Abbildung 6.8. Im Leuchtdichtebild wird spaltenweise das lokale Maximum gesucht $G_{v,\text{max}}(\beta_{\text{LMK}})$, wodurch die charakteristische HDG mit der vertikalen Neigung β an der Horizontalen, Abschnitt 2.1.1, zusammengesetzt werden kann. Ableitbar ist ein horizontaler Verlauf $P_{v,\beta}(\alpha_{\text{LMK}})$ der HDG, Abbildung 6.9.

Der H0V0-Punkt wird über die Bestimmung des Punkts mit der größten Krümmung angenähert $\kappa_{v,\text{max}}(\alpha)$. Die auf der Projektionsfläche abgebildete HDG wird von links nach rechts betrachtet, wodurch eine Linkskrümmung $P_{v,\beta}(\alpha_{\text{LMK}}) > 0$ den H0V0-Punkt beschreibt.

$$\kappa_v(\alpha_{\text{LMK}}) = \frac{\frac{d^2 P_{v,\beta}(\alpha_{\text{LMK}})}{d\alpha_{\text{LMK}}^2}}{\left(1 + \left(\frac{dP_{v,\beta}(\alpha_{\text{LMK}})}{d\alpha_{\text{LMK}}}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (6.5)$$

⁷Die untersuchte Fläche ist sehr klein und der Aufbau ist statisch, folglich ist diese Vereinfachung gerechtfertigt.

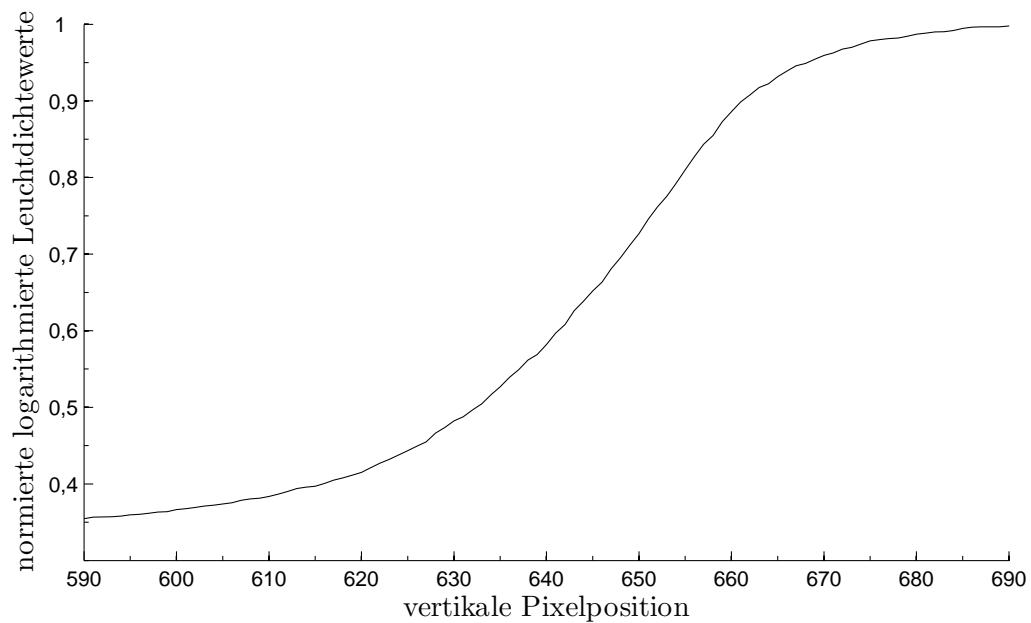


Abbildung 6.8: Darstellung der normierten logarithmierten Leuchtdichtewerte des vertikalen Leuchtdichteverlaufs auf der Projektionsfläche für eine konstante horizontale Pixelposition (400) der Leuchtdichtekamera

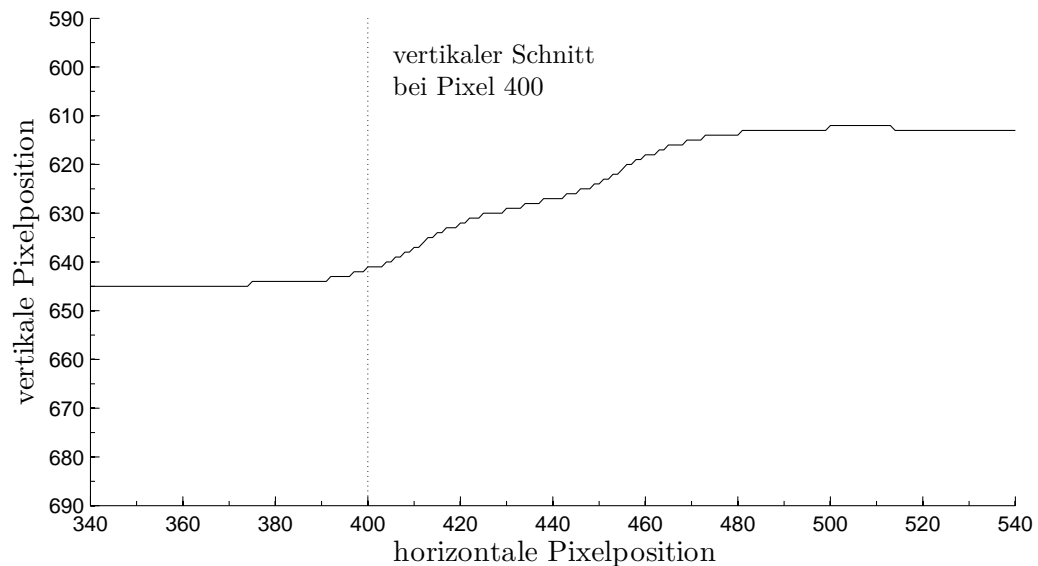


Abbildung 6.9: Darstellung der aus der indirekten Leuchtdichtemessung bestimmten HDG

Durchführung und Ergebnisse: Zur Bestimmung der geometrischen Orientierung der H0V0-Punkte mittels der indirekten Leuchtdichtemessung wird das Fahrzeug in einer Entfernung von 10 m zwischen der Hinterachse des Versuchsträgers und der Projektionsfläche positioniert. Der Abstand des Scheinwerfers zur Wand ist im Vergleich zur Probandenstudie um ungefähr 3 m verkürzt. Untersuchungen von *Flannagans et al.* zur Scheinwerfereinstellung gehen von einem Abstand von 7,6 m aus [39], was die verkürzte Messentfernung rechtfertigt und dadurch den Anteil des indirekten Streulichts durch den Boden und die Decke im Labor reduziert. Die Leuchtdichtekamera wird in der Nähe der Fahrerassistentenkamera mit einem Saugnapf befestigt. Das vorgestellte Verfahren zur Berechnung der horizontalen und der vertikalen Fehlstellung des Scheinwerfers wird auf Basis des Leuchtdichtebilds ausgeführt. Die Lage des H0V0-Punkts wird auf der Projektionsfläche mittels eines magnetischen Markierungspfeils gekennzeichnet. Die geometrische Orientierung des Punkts wird durch die Markierung über das Referenzmessverfahren, Abschnitt 6.1.3, bestimmt. Insgesamt werden neun indirekte Leuchtdichtemessungen durchgeführt, Versuchsanordnung siehe Abbildung B.2 im Anhang B.1.2. Ein Wechsel der Umfeldbeleuchtung zwischen dem Szenario des dunklen und des hellen Lichtlabors, Abschnitt 6.2.1, hat im beschriebenen Versuchsaufbau keinen Einfluss auf die Orientierung der HDG.

Die Ergebnisse zeigen eine Übereinstimmung des lichttechnisch bewerteten H0V0-Punkts mit dem kameraspezifischen H0V0-Punkt. In der Abbildung 6.10 sind die Einzelmessungen für den linken Scheinwerfer dargestellt. Ebenso sind die gemittelten Fehlstellungen der Referenzmessung und der Leuchtdichtemessung aufgezeigt, siehe hierzu auch Tabelle 6.2. Die entsprechende Abbildung für den rechten Scheinwerfer ist Anhang B.1.2 zu entnehmen.

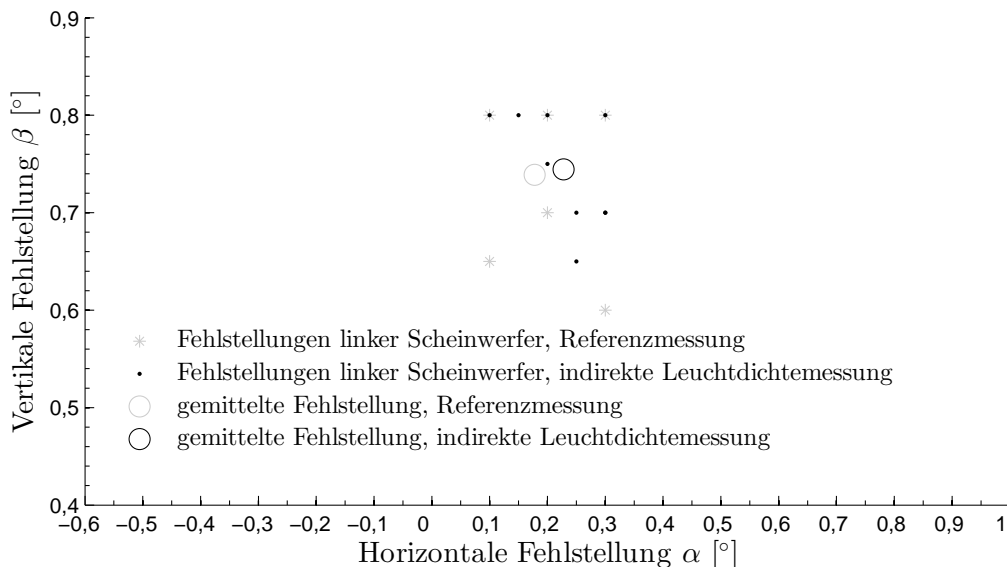


Abbildung 6.10: Darstellung der Ergebnisse der indirekten Leuchtdichtemessung und der Referenzmessung des linken Scheinwerfers in einer Entfernung von 7m zwischen Scheinwerfer und Projektionsfläche

Tabelle 6.2: Ergebnisse der indirekten Leuchtdichtemessung

Szenarien mit je 9 Messungen	horizontale Fehlstellung α		vertikale Fehlstellung β	
	Standard- abweichung σ_α	Mittelwert μ_α	Standard- abweichung σ_β	Mittelwert μ_β
linker Scheinwerfer indirekte Leucht- dichtemessung	0,0712°	0,2278°	0,0583°	0,7444°
rechter Scheinwerfer indirekte Leucht- dichtemessung	0,1130°	0,2444°	0,0808°	0,8056°
linker Scheinwerfer Referenzmessung	0,0833°	0,1778°	0,0782°	0,7389°
rechter Scheinwerfer Referenzmessung	0,1034°	0,1722°	0,0618°	0,7778°

Die kamerabasierte HDG-Erkennung kann auf Basis der Ergebnisse der Probandenstudie und der indirekten Leuchtdichtemessung als hinreichend genaues Messverfahren zur Bestimmung der geometrischen Orientierung des H0V0-Punkts angenommen werden. Eine automatisierte Scheinwerfereinstellung über eine Erkennung der HDG mittels der Fahrerassistenzkamera ist aus lichttechnischer Sicht möglich.

6.2.3 Geometrische HDG-Änderung und Klassifizierungsverfahren

Das charakteristische Merkmal der Scheinwerferlichtverteilung ist der H0V0-Punkt der HDG, Abschnitt 2.1.1. Eine unveränderliche geometrische Orientierung dieses Charakteristikums ist für die Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung notwendig. Aus den Abschnitten 3.2.1 und 6.2.1 ist eine Lageänderung der HDG ableitbar. Die Identifikation dieser Diskrepanz ist zur Wahrung der Einstellgenauigkeit erforderlich.

Geometrische Änderung der HDG: Aus Abschnitt 6.2.2 ist bekannt, dass die durch die Fahrerassistenzkamera bestimmte HDG mit der lichttechnisch ermittelten HDG übereinstimmt. Folglich wird dieses Kamerasystem bei den nachfolgenden Betrachtungen neben der Leuchtdichtekamera ebenfalls genutzt. In Abbildung 6.11 sind die HDGs des linken und des rechten Scheinwerfers im dunklen Lichtlabor, vergleiche Abschnitt 6.2.1, auf dem Bild der Fahrerassistenzkamera dargestellt. Der linke Scheinwerfer zeigt die Ausprägung einer doppelten HDG, für den rechten Scheinwerfer ist dies in dieser Szene nicht existent. Im hellen Lichtlabor, Abbildung 6.12, ist jeweils nur eine HDG für die Scheinwerfer sichtbar. Untersuchungen unter Laborbedingungen mit den genannten Kamerasystemen zeigen, dass die Umfeldbeleuchtung und die Distanz zur Projektionsfläche die Ausprägung der doppelten HDG

bzw. die Verlagerung der HDG beeinflussen. Am Beispiel des rechten Scheinwerfers in Abbildung 6.11 ist ersichtlich, dass durch die Überlagerung mit der linken Scheinwerferlichtverteilung die Umfeldbeleuchtung an der HDG des rechten Scheinwerfers erhöht wird, wodurch keine geometrische Änderung entsteht.

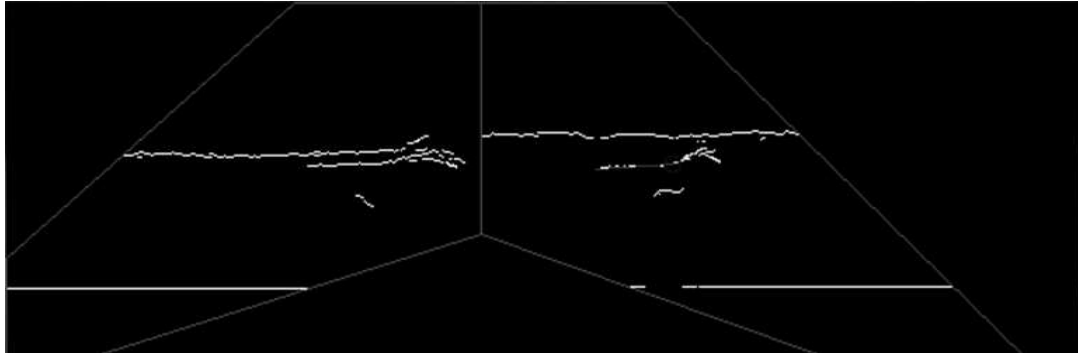


Abbildung 6.11: Kantendarstellung der doppelten HDG des linken Scheinwerfers bei dunkler Umfeldbeleuchtung auf dem Fahrerassistenzkamerabild

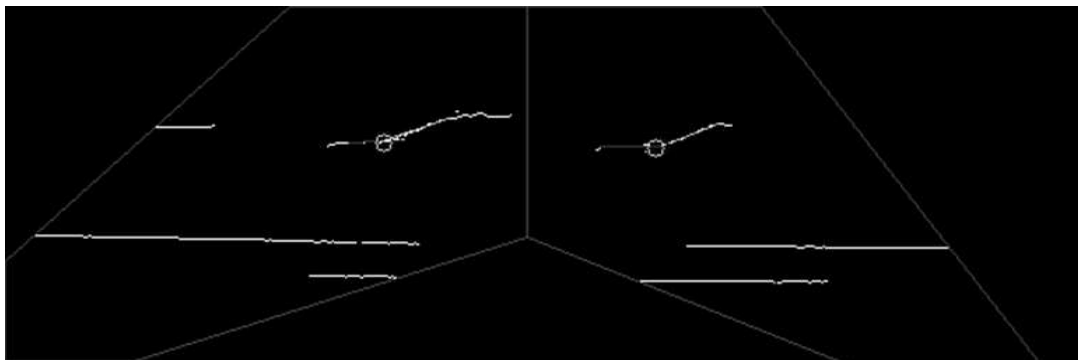


Abbildung 6.12: Kantendarstellung der HDGs des linken und des rechten Scheinwerfers bei heller Umfeldbeleuchtung auf dem Fahrerassistenzkamerabild

Die in Abbildung 6.11 deutlich ausgeprägte obere HDG (HDG Farbsaum) ist auf den Farbsaum, der durch die chromatische Aberration entsteht, Abschnitt 2.1.2, zurückzuführen. Die untere HDG (HDG subjektive Wahrnehmung) entspricht der subjektiv wahrgenommenen HDG der Probandenstudie, Abschnitt 6.2.1. Herausgestellt werden kann, dass der vertikale Winkelversatz zwischen den beiden HDGs ungefähr $\Delta\beta_{\text{HDG}} \approx 0,4^\circ$ beträgt. Diese Aussage geht aus indirekten Leuchtdichtemessungen in unterschiedlichen Distanzen⁸ im Lichtlabor und aus Kantendarstellungen auf dem Bild der Fahrerassistenzkamera hervor, siehe hierzu Tabelle B.3 im Anhang B.2.3 sowie [140]. Das Referenzmessverfahren aus Abschnitt 6.1.3 wird genutzt, um die Winkelinformationen aus der Perspektive der Kamerasysteme auf die jeweilige Scheinwerferperspektive zu übertragen und den angegebenen Winkelversatz zu bestimmen. Mittels der Leuchtdichtekamera sind zwei weitere HDGs erkennbar, die

⁸Der Entfernungsbereich zwischen Hinterachse des Versuchsträgers und Projektionsfläche beträgt 7,5 m - 13 m.

oberhalb der oberen HDG und unterhalb der unteren HDG liegen, Abbildung B.13 im Anhang B.2.3. Diese werden maßgeblich durch das Streulicht und den Hotspot des Scheinwerfers gebildet. Ein signifikanter horizontaler Versatz der resultierenden H0V0-Punkte ist nicht nachweisbar.

Klassifizierungsverfahren: Die aufgezeigten diskreten HDG-Lagen mit bis zu vier unterschiedlichen geometrischen Orientierungen sollten grundsätzlich durch die Bildverarbeitung identifizierbar sein. Alternativ besteht jedoch die Möglichkeit, retrospektiv die unterschiedlichen HDG-Lagen aus den Kamerainformationen zu synthetisieren, sodass trotz veränderter Orientierung der HDG mit definierten Winkel-Offsets eine Kalibrierung durchgeführt werden kann. Das hierfür genutzte Verfahren ist die *Lernende Vektor Quantisierung*, kurz *LVQ*, die im Kontext neuronaler Netze der Kategorie des Wettbewerbslernens angehört. Das angesprochene Klassifizierungsverfahren ist ein überwacht Verfahren, das Trainingsdaten in Form von Merkmalsvektoren notwendig macht. Bei dem *LVQ-Verfahren* ist die Zuordnung der Merkmalsvektoren aus den Trainingsdaten zu den jeweiligen Klassen bekannt. Auf Basis dieser Datenmenge wird für jede Klasse ein Prototyp angelernt. Ausgehend von einem Start-Prototyp wird dieser bei Merkmalsvektoren, die der gleichen Klasse angehören, in deren Richtung verschoben. Entsprechend wird der Start-Prototyp bei Merkmalsvektoren einer anderen Klasse von diesen entfernt. Nach jedem Iterationsschritt wird das Anziehen bzw. Abstoßen verringert. Abschließend bilden sich die Prototypen der jeweiligen Klassen. Eine Zuordnung weiterer Merkmalsvektoren zu den jeweiligen Klassen erfolgt durch den kleinsten euklidischen Abstand zu dem jeweiligen Prototyp [29], [102].

Im Fall der Veränderung der HDG-Lagen werden drei Klassen definiert. Die HDG des Farbsaums (HDG-Klasse 3), der subjektiven Wahrnehmung (HDG-Klasse 2) und des Hotspots der Lichtquelle (HDG-Klasse 1). Die HDG des Streulichts wird vernachlässigt, da diese nicht durch die Fahrerassistenzkamera erkannt wird. Der Merkmalsvektor setzt sich zum einen aus geometrischen Informationen wie den Linielängen der Horizontalen und des Anstiegs ($l_{\text{Horizontale}}$, l_{Anstieg}) sowie aus dem Schnittwinkel η , den die genannten Geraden einschließen, zusammen. Zum anderen werden Bildverarbeitungsinformationen wie der Schwellwert T_2 des *Otsu-Canny-Algorithmus* der Kantendarstellung, Abschnitt 5.1.2, und der maximale sowie der minimale Histogrammwert ($Hist_{\text{max}}$, $Hist_{\text{min}}$) des untersuchten Bildausschnitts nach der Anwendung von *CLAHE* verwendet. Die ausgewählten Merkmale gehen auf die vorangegangenen Untersuchungen zur geometrischen Änderung der HDG zurück. Die herausgestellte Abhängigkeit von der Umfeldbeleuchtung rechtfertigt die genutzten Bildverarbeitungsinformationen. Der Einfluss der Distanz begründet die Nutzung der Geometrieinformationen. In Abbildung 6.13 sind die genannten Merkmale nochmals dargestellt.

Durch die Kenntnis der konstanten Winkelversätze zwischen den HDG-Lagen und durch das Referenzmessverfahren in den Versuchsträgern, Abschnitt 6.1.3, kann in der jeweiligen Szene die HDG-Lage bestimmt werden. Zusätzlich können die vorgestellten Merkmale gespeichert werden, vergleiche Anhang C.2 und [136], wodurch die Generierung der Trainingsdaten im Labor und im Verkehrsraum möglich ist.

Das *LVQ-Verfahren* nach [143] wird in den nachfolgenden Untersuchungen angewendet, Abschnitte 6.3.2, 6.3.3 und 6.3.4.

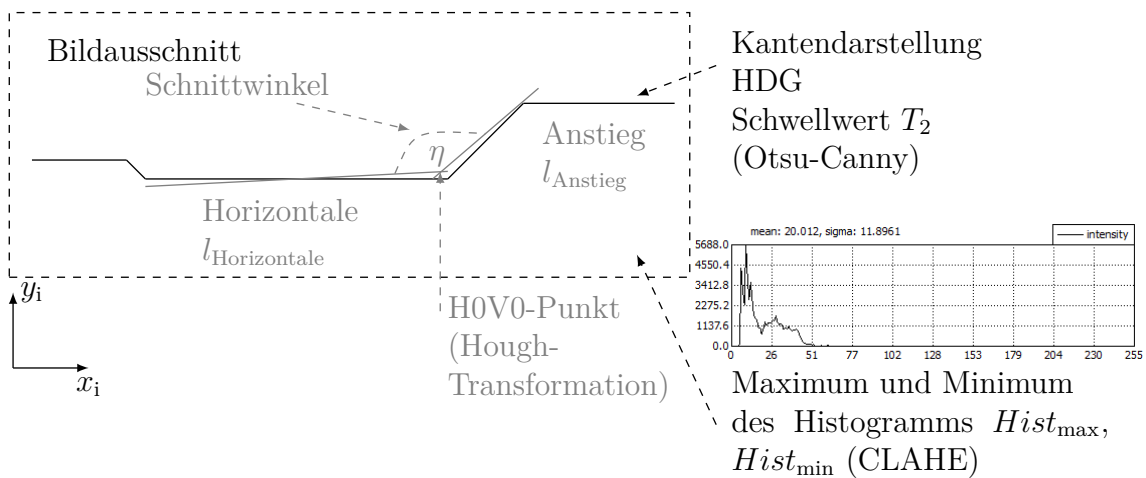


Abbildung 6.13: Merkmale für das Klassifizierungsverfahren

6.3 Anwendung des Kalibrierverfahrens bei einem Serienscheinwerfer

Das Kalibrierverfahren wird zunächst mit dem in Abschnitt 6.1.2 vorgestellten Serien-LED-Scheinwerfer durchgeführt. Für den Kalibrierablauf werden $p = 11$ charakteristische Punkte für alle Untersuchungen verwendet, wobei die einzelnen Verfahrenpositionen Abschnitt 5.2.3 zu entnehmen sind. Die Grundeinstellung ist im Zuge einer Untersuchung zwar konstant, nicht aber über alle Untersuchungen identisch. In Abschnitt 6.3.1 werden die in Kapitel 5, Abschnitt 5.3.1, definierten Berechnungsverfahren angewandt und miteinander verglichen. Die Möglichkeiten zur Verringerung der Anzahl der charakteristischen Punkte werden in Abschnitt 6.3.2 aufgezeigt. Den Abschluss bildet die Anwendung des Kalibrierverfahrens unter statischen Bedingungen im Labor, Abschnitt 6.3.3, und unter Einfluss der Dynamik im Verkehrsraum, Abschnitt 6.3.4. Die Untersuchungen sind durch die adaptive Bildverarbeitung der HDG-Erkennung unter wechselnden Lichtbedingungen durchführbar.

6.3.1 Vergleich der verschiedenen Berechnungsansätze

Für die automatisierte Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation gibt es nach Abschnitt 5.3.1 entsprechend dem Drehsystem des Scheinwerfersystems unterschiedliche Berechnungsansätze. Die Berechnungsmodelle basieren auf der Anordnung der Drehmatrizen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine explizite Lösung oder das *Newton-Verfahren* zu nutzen. Letzteres bietet einen allgemeingültigen Lösungsweg für alle Ansätze.

Im Folgenden wird ein Vergleich von zwei Berechnungsmodellen durchgeführt, wobei eines der beiden Modelle iterativ und explizit gelöst werden kann. In Summe stehen somit drei verschiedene Berechnungsverfahren zur Verfügung. Der erste Ansatz entspricht dem Modellansatz 1, Abschnitt 5.3.1, Gleichung 5.11, der für das Referenzmessverfahren in Abschnitt 6.1.3 verwendet wird. Für das zweite Modell wird der Modellansatz 3, Gleichung 5.19, genutzt. Dieser bildet die vereinfachten geometrischen Beziehungen des vorgestellten Serienscheinwerfers, Abschnitt 6.1.2, ab. Die Kalibrierszene sieht eine statische Kalibrierung an einer Projektionsfläche vor, die in einem definierten Abstand von 10 m zur Hinterachse des Fahrzeugs senkrecht zur Fahrzeuglängsachse orientiert ist⁹. Insgesamt wird die Kalibrierung 10-mal nacheinander für jede der drei Varianten durchgeführt, um eine Standardabweichung zu bestimmen. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit der Probandenstudie, Abschnitt 6.2.1, und der indirekten Leuchtdichtemessung, Abschnitt 6.2.2, wird die Anzahl der Einzelergebnisse zu $N(11, 11) = 605$ gewählt, da nach Abschnitt 4.4.3 die zu erwartende Standardabweichung der horizontalen und der vertikalen Fehlstellung mit $0, 1^\circ$ im Mittel den Resultaten der Voruntersuchungen entspricht.

Tabelle 6.3: Vergleich der verschiedenen Berechnungsmodelle

Geometriemodelle Lösungsansätze	horizontale Fehlstellung α		vertikale Fehlstellung β	
	Standard- abweichung σ_α	Mittelwert μ_α	Standard- abweichung σ_β	Mittelwert μ_β
$D_{z,\phi}D_{y,\theta}D_{z,\alpha}D_{y,\beta}$ explizite Lösung	0, 1293°	0, 0282°	0, 1080°	0, 5932°
$D_{z,\phi}D_{y,\theta}D_{z,\alpha}D_{y,\beta}$ Newton-Verfahren	0, 1241°	0, 1120°	0, 1056°	0, 5431°
$D_{y,\beta}D_{z,\alpha}D_{y,\theta}D_{z,\phi}$ Newton-Verfahren	0, 1615°	0, 0905°	0, 1232°	0, 5519°
Referenzmessung	—	0, 0000°	—	0, 6000°

Die Daten in Tabelle 6.3 zeigen, dass die Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungsansätze keine signifikanten Unterschiede aufweisen und die Vorgaben der Referenzmessung erreicht werden. Hinsichtlich der Standardabweichung sind die Lösungsansätze auf einem Niveau, wobei das *Newton-Verfahren* mit dem Drehsystem nach $D_{z,\phi}D_{y,\theta}D_{z,\alpha}D_{y,\beta}$ die geringsten Abweichungen zeigt. Im Hinblick auf eine Serienumsetzung und eine breite Anwendung für verschiedene Scheinwerfersysteme scheint das *Newton-Verfahren* am flexibelsten, da hierdurch der am besten passende Modellansatz genutzt werden kann, der Berechnungsweg aber nicht grundlegend verändert werden muss. Hinsichtlich der Drehmatrizenanordnung ist ein geringfügiger Unterschied gegeben, eine eindeutige Aussage kann allerdings nur auf Basis größerer Messreihen gewonnen werden. Eine vollständige exakte Nachbildung des konstruktiven Aufbaus des Serienscheinwerfers zeigt eine deutliche Verschlechterung

⁹Die Positionierung des Fahrzeugs entspricht dem Versuchsaufbau der indirekten Leuchtdichtemessung.

der Gesamtergebnisse, da die definierten Verfahrenswinkel des Hauptscheinwerfers nicht auf das konstruktive Modell ausgelegt sind. Vielmehr gehen die Winkelangaben auf eine Modellannahme zurück, bei der der Scheinwerfer als punktförmige Lichtquelle betrachtet wird.

6.3.2 Einfluss der Anordnung der charakteristischen Punkte

Die Basis für die Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung in horizontaler und vertikaler Richtung liegt in der Detektion der verlagerten HDG durch die Fahrerassistentenkamera. Aus den Abschnitten 4.4.2 und 4.4.3 ist bekannt, dass die Anzahl $N(p, w)$ der Einzelergebnisse das Gesamtergebnis bestimmt. Die Anzahl $N(p, w)$ der Einzelergebnisse wird dabei durch die charakteristischen Punkte p und die Wiederholrate w gesteuert. Nachfolgend wird untersucht, inwiefern eine verringerte Anzahl der charakteristischen Punkte unter realen Bedingungen durch eine erhöhte Wiederholrate kompensiert werden kann.

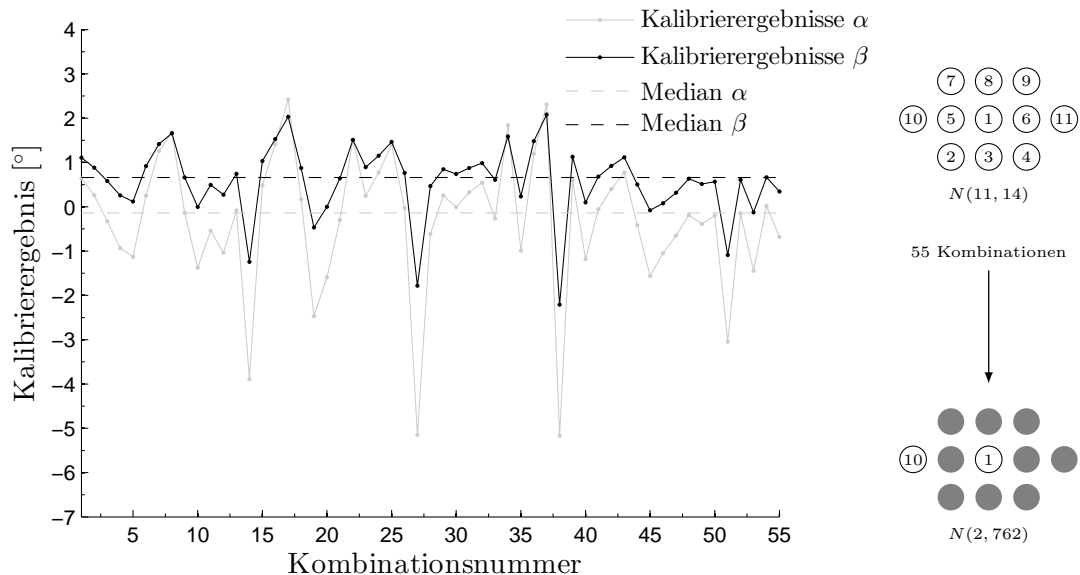


Abbildung 6.14: Darstellung der Kalibrierergebnisse mit $p = 2$ charakteristischen Punkten und einer Wiederholrate von $w = 762$ für verschiedene Punktkombinationen

Die Untersuchungen gründen auf einem Kalibrierprozess mit $p = 11$ charakteristischen Punkten, die nacheinander jeweils $w = 762$ mal erfasst werden, Verfahrenswinkel siehe Abschnitt 5.2.3. Auf Basis dieser Messdaten wird die aufgeworfene These untersucht, indem die Messergebnisse zu Kalibrierabläufen mit $N(11, 14) = 770$ und $N(2, 762) = 762$ Einzelergebnissen zusammengefasst werden. Die Datenmenge wird aus Messungen gewonnen, die unter Laborbedingungen aus verschiedenen statischen Entfernungen zur Projektionsfläche und aus Bewegungen des Fahrzeugs vor

der Projektionsfläche durchgeführt werden (Distanzen zwischen 9 m und 11 m)¹⁰. Es wird der linke Hauptscheinwerfer untersucht. Bei der Durchführung der Messungen wird darauf geachtet, dass die geometrische Orientierung der HDG erhalten bleibt. Hierfür wird das Klassifizierungsverfahren mittels *LVQ-Prototypen*, Abschnitt 6.2.3, genutzt.

Unter Berücksichtigung der elf charakteristischen Punkte sind 55 Kombinationsmöglichkeiten gegeben, die jeweils einen Kalibrierablauf mit $N(2, 762) = 762$ Einzelergebnissen abbilden. Die resultierenden Kalibrierergebnisse sind Abbildung 6.14 zu entnehmen. Die der Kombinationsnummer entsprechenden charakteristischen Punkte sind in Tabelle B.2 im Anhang B.1.1 dargestellt.

Der Median der horizontalen und der vertikalen Fehlstellungen der 55 verschiedenen Kalibriervorgänge $N(2, 762)$ ist mit $\alpha_{\Sigma N(2,762),\text{Med}} = -0,1371^\circ$ und $\beta_{\Sigma N(2,762),\text{Med}} = 0,6629^\circ$ in Übereinstimmung mit dem Kalibrierergebnis für einen beispielhaften Kalibrierprozess mit $N(11, 14)$ mit $\alpha_{N(11,14)} = -0,1069^\circ$ und $\beta_{N(11,14)} = 0,6803^\circ$.

Für jede einzelne Kalibrierdurchführung mit $N(2, 762)$ ist dies nicht der Fall. Folglich wird die Datenmenge genauer untersucht, wobei die Häufigkeit eines jeweiligen Kalibrierergebnisses betrachtet wird. Auf Basis der ermittelten horizontalen Fehlstellungen wird eine Häufigkeitsverteilung der Ergebnisse erstellt. Eine Intervallbreite von $0,2^\circ$ wird angenommen. Die horizontale und die vertikale Fehlstellung für den entsprechenden Intervallbereich wird aus einer Mittelung der im Intervall befindlichen Kalibrierergebnisse gewonnen.

Der Verteilung aus Abbildung 6.15 ist zu entnehmen, dass der Fehlstellung mit $\alpha_{N(2,762),-0,2^\circ \text{ bis } 0,0^\circ} = -0,0928^\circ$ und $\beta_{N(2,762),-0,2^\circ \text{ bis } 0,0^\circ} = 0,6906^\circ$ die meisten Kombinationen (7 von 55) zugeordnet werden. Die Fehlstellungen mit den nächst kleineren Häufigkeiten (6 von 55)¹¹ und (5 von 55)¹² liegen um den Peak verteilt. Ebenso sind die Kalibrierergebnisse im Intervall¹³ $0,0^\circ$ bis $0,2^\circ$ interessant, da diese je nach Definition der Intervallgrenzen die Bildung des Maximums der Häufigkeitsverteilung beeinflussen. Unter der Annahme, dass lediglich die 14 durch den Kreis markierten Kombinationen, Abbildung 6.15, für die Kalibrierung zugelassen werden ist eine Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung mit 2 charakteristischen Punkten und einer erhöhten Wiederholrate mit einer Einstelltoleranz von $\pm 0,3^\circ$ möglich.

Ausgehend von der Simulationsumgebung in Abschnitt 4.4.1 wird die experimentell untersuchte Szene unter idealen Bedingungen nachgebildet. Für die angenommenen Distanzen zwischen Projektionsfläche und Hinterachse des Fahrzeugs werden Werte zwischen 8,9 m und 11,7 m in einer Auflösung von 0,1 m genutzt. Die zu bestimmende Fehlstellung wird mit $\alpha_{N(2,29)} = -0,1220^\circ$ und $\beta_{N(2,29)} = 0,6716^\circ$ angesetzt¹⁴. Jeder der 55 Kalibrierabläufe umfasst $N(2, 29) = 29$ Einzelergebnisse aus

¹⁰Die Distanzen sind von der Hinterachse des jeweiligen Fahrzeugs gemessen.

¹¹ $\alpha_{N(2,762),0,2^\circ \text{ bis } 0,4^\circ} = 0,2890^\circ$ und $\beta_{N(2,762),0,2^\circ \text{ bis } 0,4^\circ} = 0,8912^\circ$.

¹² $\alpha_{N(2,762),-0,4^\circ \text{ bis } -0,2^\circ} = -0,2957^\circ$ und $\beta_{N(2,762),-0,4^\circ \text{ bis } -0,2^\circ} = 0,5826^\circ$.

¹³ $\alpha_{N(2,762),0,0^\circ \text{ bis } 0,2^\circ} = 0,0941^\circ$ und $\beta_{N(2,762),0,0^\circ \text{ bis } 0,2^\circ} = 0,7702^\circ$.

¹⁴Die horizontale und die vertikale Fehlstellung ermitteln sich aus den Mittelwerten der Fehlstellungen von $\alpha_{N(11,14)}$ und $\alpha_{\Sigma N(2,762),\text{Med}}$ sowie $\beta_{N(11,14)}$ und $\beta_{\Sigma N(2,762),\text{Med}}$.

29 unterschiedlichen Distanzen. Nachfolgend werden die Kalibrieranordnungen herausgefiltert, deren horizontale Fehlstellung zwischen $0,4^\circ > \alpha_{N(2,29)} > -0,4^\circ$ liegt.

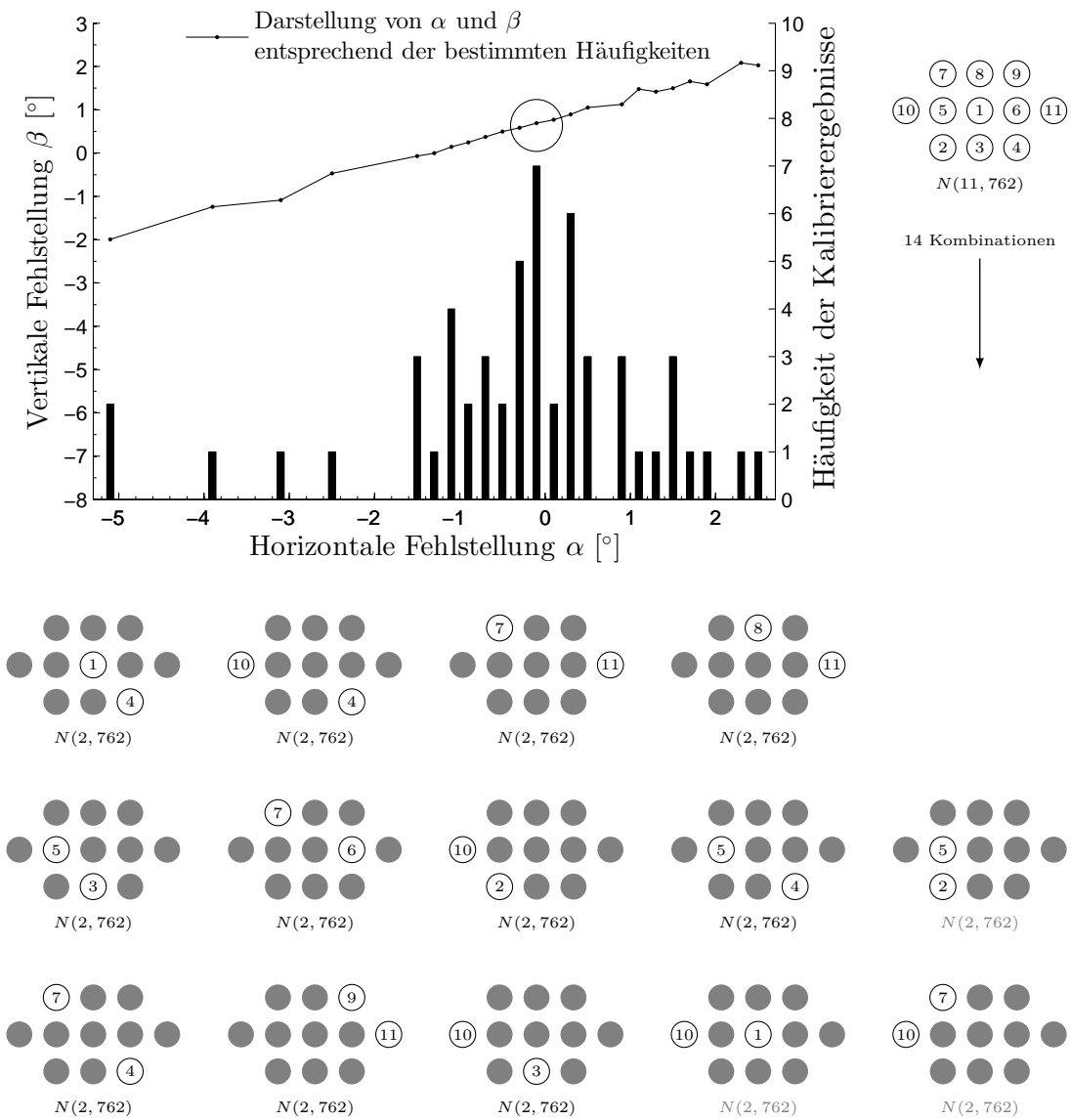


Abbildung 6.15: Häufigkeitsverteilung der Kalibrierergebnisse für verschiedene Kalibriervorgänge mit $N(2, 762)$ und schematische Darstellung ausgewählter Punktkombinationen

Die Simulation zeigt, dass 47 der 55 Kalibrierprozesse innerhalb des geforderten Winkelbereichs liegen. Alle vierzehn markierten Kombinationen der experimentellen Untersuchung, die ebenfalls in diesem Intervall liegen, Abbildung 6.15, sind in der Menge der 47 Kombinationen enthalten. Wird der Filterbereich für die horizontale Fehlstellung in der Simulation auf $0,2^\circ > \alpha_{N(2,29)} > -0,2^\circ$ verringert, sind zwölf Kombinationen der realen Kalibrierabläufe unter den 34 simulativ bestimmten Kombinationen, die die härtere Forderung erfüllen. Die Punktkombinationen (1 und 10) und (7 und 10) liegen nicht mehr in der Wertemenge. Weitere Simulationen

mit veränderten Fehlstellungen $\alpha'_{N(2,29)}$ bzw. $\beta'_{N(2,29)}$ und variierten Anbaupositionen führen zu dem Schluss, dass die Punktkombinationen (1 und 8, 3 und 7, 3 und 10, 4 und 5, 4 und 7, 4 und 8, 4 und 10, 5 und 7, 6 und 7, 7 und 11) die Vorgaben an den Winkelbereich für die horizontale Fehlstellung von $\alpha'_{N(2,29)} + 0,1^\circ > \alpha'_{N(2,29)} > \alpha'_{N(2,29)} - 0,1^\circ$ erfüllen. Die horizontalen Fehlstellungen der Punktkombinationen (3 und 10, 4 und 7, 6 und 7) des realen Kalibrierverfahrens liegen im Winkelbereich $\alpha_{N(2,762),-0,2^\circ} \text{ bis } 0,0^\circ + 0,1^\circ > \alpha_{N(2,762),-0,2^\circ} \text{ bis } 0,0^\circ > \alpha_{N(2,762),-0,2^\circ} \text{ bis } 0,0^\circ - 0,1^\circ$.

Es bestätigen sich demnach drei der zehn simulativ bestimmten Punktkombinationen, die eine Berechnung der Fehlstellung mit zwei Verfahrenswinkeln und einer Einstelltoleranz von $\pm 0,1^\circ$ zulassen. Folglich ist ein Kalibrierablauf mit zwei charakteristischen Punkten möglich, jedoch muss die Winkellage der Punkte zueinander beachtet werden. Bei einer erhöhten Anzahl an charakteristischen Punkten rücken die Winkelunterschiede der Charakteristika in den Hintergrund. In Anhang B.2.1 wird das dargestellte Verfahren mit weiteren Messdaten ausgeführt und zeigt ein ähnliches Verhalten.

Herausgestellt werden kann, dass zwei charakteristische Punkte gute Ergebnisse liefern, wenn die Verfahrenswinkel unterschiedliche Horizontal- und Vertikalpositionen haben. Für den linken Scheinwerfer liegt der linke Punkt höher (links-diagonal). Beim rechten Scheinwerfer werden bessere Ergebnisse erzielt, wenn der rechte Punkt höher liegt (rechts-diagonal). In Abbildung 6.15 wird die beschriebene links-diagonale Punktanordnung durch eine nicht ausgegraute Unterschrift hervorgehoben. Insgesamt sind bei der genutzten Anordnung fünfzehn links-diagonale Anordnungen möglich. Davon liefern elf Punktkombinationen ein Ergebnis mit einer Einstelltoleranz von $\pm 0,3^\circ$.

6.3.3 Einfluss der Detektionsdistanz

Die automatisierte Scheinwerfereinstellung benötigt im Gegensatz zu der in Abschnitt 6.2 vorgestellten indirekten Leuchtdichtemessung und der visuell-manuellen Methode keine Entfernungs- und Orientierungsangaben zwischen Fahrzeug und Projektionsfläche, vergleiche die Abschnitte 3.2.3 und 4.3.2. Nachfolgend wird die Distanzunabhängigkeit der Onlinekalibrierung überprüft.

Das Kalibrierverfahren wird in 18 unterschiedlichen Distanzen zwischen 6,50 m und 10,75 m zur Projektionsfläche unter Laborbedingungen statisch durchgeführt¹⁵, da nur im angegebenen Entfernungsbereich eine uneingeschränkte Erkennung der H0V0-Punkte des Serienscheinwerfers unter Laborbedingungen möglich ist. Die Abstände zwischen den einzelnen Kalibrierstandorten betragen ungefähr 0,25 m. Das in Abschnitt 6.2.3 eingeführte Klassifizierungsverfahren und die in Abschnitt 4.4.5 vorgestellte gleichverteilte Variation der Verfahrenswinkelpositionen werden bei der Durchführung der Kalibrierung genutzt. Die Anzahl der Einzelergebnisse zur Bestimmung des Gesamtergebnisses wird zu $N(11, 20) = 1.100$ festgelegt, abgeleitet aus den Erkenntnissen in Abschnitt 4.4.3 für eine Standardabweichung von $0,1^\circ$ für die horizontale

¹⁵Die Angaben beziehen sich auf die Hinterachse des Versuchsträgers.

Fehlstellung. Über das Referenzmessverfahren, Abschnitt 6.1.3, wird die Referenzfehlstellung in jeder Messentfernung bestimmt. Die Kalibrierung wird nacheinander zuerst für den linken und dann für den rechten Scheinwerfer durchgeführt.

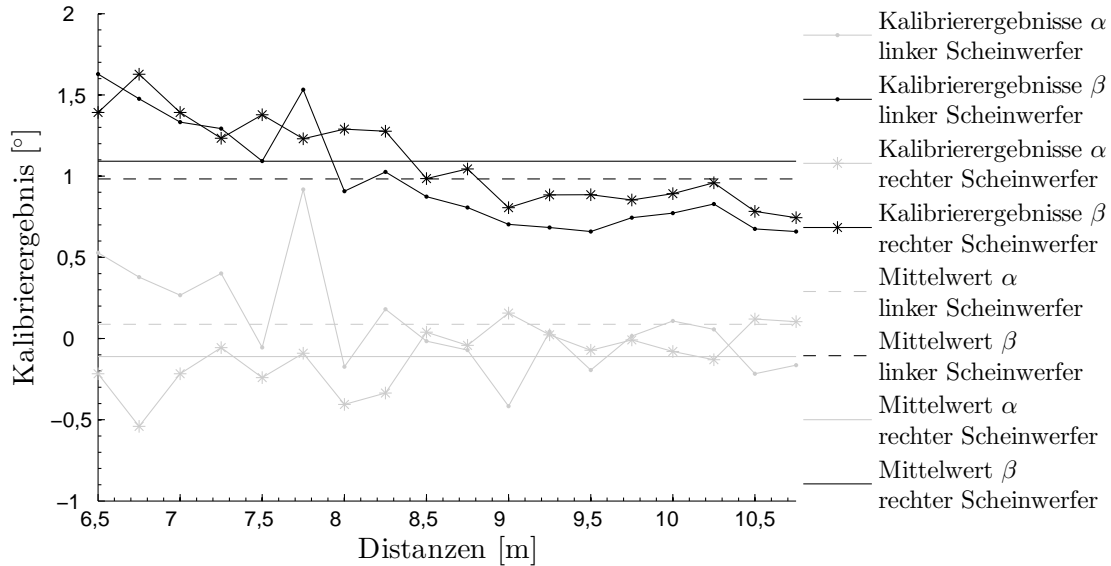


Abbildung 6.16: Kalibrierergebnisse des linken und rechten Scheinwerfers in verschiedenen Distanzen zwischen Projektionsfläche und Hinterachse

Die Einzelergebnisse für die beiden Scheinwerfer sind in Abbildung 6.16 dargestellt. Die vertikalen und die horizontalen Fehlstellungen unterscheiden sich jeweils im Mittel um $\Delta\alpha_{\text{links,rechts}} \approx 0,2^\circ$ und $\Delta\beta_{\text{links,rechts}} \approx 0,1^\circ$. Ein Vergleich mit den erfolgten Referenzmessungen, Abbildungen 6.17 und 6.18, zeigt nahezu eine Übereinstimmung des Kalibrierergebnisses der vertikale Fehlstellungen für den linken und rechten Scheinwerfer mit $\mu_{\beta,\text{links,Kalib}} = 0,9826^\circ$ und $\mu_{\beta,\text{links,Referenz}} = 0,8440^\circ$ sowie $\mu_{\beta,\text{rechts,Kalib}} = 1,0917^\circ$ und $\mu_{\beta,\text{rechts,Referenz}} = 1,0056^\circ$.

Unter Berücksichtigung der horizontalen Fehlstellung werden für beide Scheinwerfer Abweichungen von $\Delta\alpha_{\text{links,Kalib,Referenz}} \approx 0,25^\circ$ und $\Delta\alpha_{\text{rechts,Kalib,Referenz}} \approx 0,38^\circ$ festgestellt. Der Referenzwert der horizontalen Fehlstellung ist mit Blickrichtung auf die Projektionsfläche bei beiden Scheinwerfern im Vergleich zum Kalibrierergebnis weiter links. Mögliche Einflussfaktoren für diesen Sachverhalt sind die Toleranzen bei der Entfernungsmessung, die Ausrichtung des Fahrzeugs vor der Kalibrierfläche und die subjektive Bewertung der HDG auf dem Kantenbild¹⁶. Sowohl bei den Kalibrierergebnissen als auch bei den Referenzmessungen, Abbildungen 6.16, 6.17 und 6.18, ist eine Zunahme des Werts für die vertikale Fehlstellung bei Entfernungen, die kleiner als 8,50 m sind, ersichtlich. Zusätzlich divergieren die Referenz- und Kalibrierwerte in diesem Distanzbereich stärker. Die Indizien erhärten sich, dass im geringeren Entfernungsbereich eine veränderte Lage der HDG in bestimmten Verfahrenpositionen vorliegt. Das in Abschnitt 6.2.3 genutzte Klassifizierungsverfahren ordnet vereinzelt der HDG in diesem Bereich eine abweichende HDG-Klasse zu.

¹⁶Eine Abweichung von 5 Pixeln in der Horizontalen kann das Ergebnis um bis zu $0,3^\circ$ verändern.

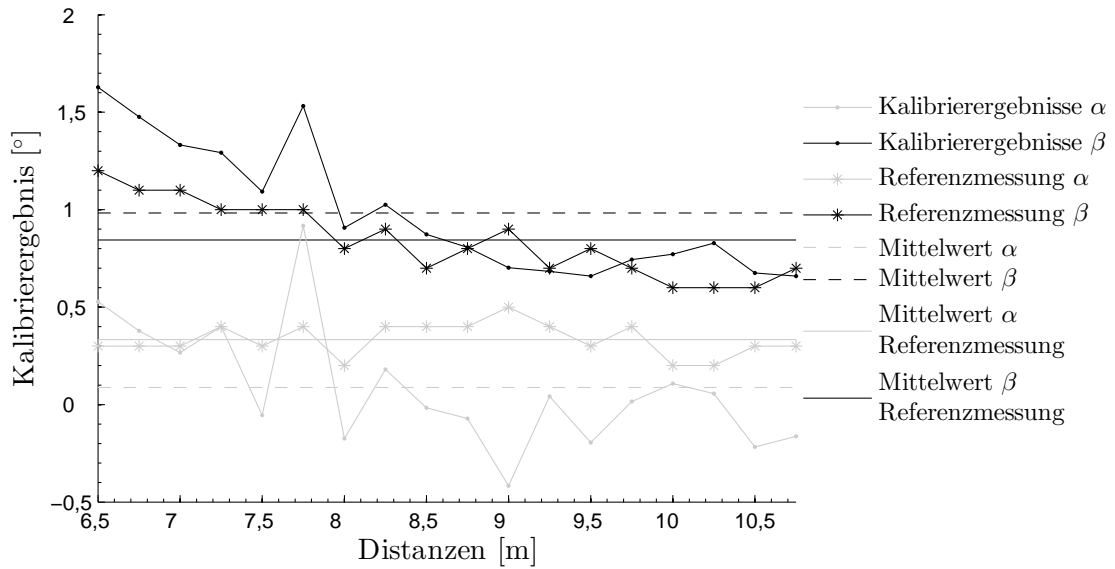


Abbildung 6.17: Kalibrierergebnisse des linken Scheinwerfers in verschiedenen Distanzen zwischen Projektionsfläche und Hinterachse im Vergleich zu den Referenzmessungen

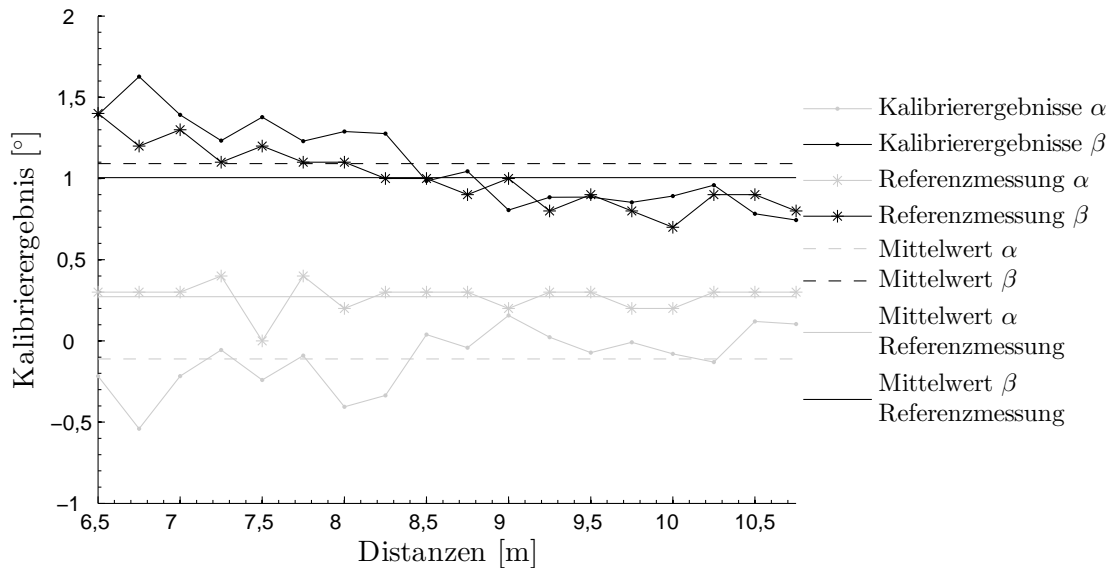


Abbildung 6.18: Kalibrierergebnisse des rechten Scheinwerfers in verschiedenen Distanzen zwischen Projektionsfläche und Hinterachse im Vergleich zu den Referenzmessungen

Die Standardabweichungen der Referenzmessungen und Kalibrierergebnisse unterscheiden sich über den gesamten untersuchten Distanzbereich mit $\sigma_{\alpha,\text{links,Kalib}} = 0,3189^\circ$ zu $\sigma_{\alpha,\text{links,Referenz}} = 0,0840^\circ$, $\sigma_{\beta,\text{links,Kalib}} = 0,3289^\circ$ zu $\sigma_{\beta,\text{links,Referenz}} = 0,1886^\circ$, $\sigma_{\alpha,\text{rechts,Kalib}} = 0,1869^\circ$ zu $\sigma_{\alpha,\text{rechts,Referenz}} = 0,0895^\circ$ und $\sigma_{\beta,\text{rechts,Kalib}} = 0,2627^\circ$ zu $\sigma_{\beta,\text{rechts,Referenz}} = 0,1893^\circ$ deutlich.

Mit Fokus auf das Klassifizierungsverfahren wird ab einer Kalibrierentfernung von 8,50 m ausschließlich eine HDG-Klasse bestimmt, was eine deutliche Veränderung in der Beziehung zwischen Referenzmessung und Ergebnis der Kalibrierung aufzeigt. Die sich ergebenden Standardabweichungen der Fehlstellungen aus den zehn Distanzen zwischen 8,50 m und 10,75 m zeigen eine deutliche Annäherung der Soll- und Istwerte mit $\sigma'_{\alpha,\text{links,Kalib}} = 0,1613^\circ$ zu $\sigma'_{\alpha,\text{links,Referenz}} = 0,0966^\circ$, $\sigma'_{\beta,\text{links,Kalib}} = 0,0767^\circ$ zu $\sigma'_{\beta,\text{links,Referenz}} = 0,0994^\circ$, $\sigma'_{\alpha,\text{rechts,Kalib}} = 0,0947^\circ$ zu $\sigma'_{\alpha,\text{rechts,Referenz}} = 0,0483^\circ$ und $\sigma'_{\beta,\text{rechts,Kalib}} = 0,0934^\circ$ zu $\sigma'_{\beta,\text{rechts,Referenz}} = 0,0949^\circ$. Im Vergleich zu den Messergebnissen aus Abschnitt 6.3.1, Tabelle 6.3, in 10 m Entfernung sind die Standardabweichungen teilweise geringer.

Tabelle 6.4: Ergebnisse für den Serienschleicher in statischen Situationen

Szenarien mit Serienschleicher	horizontale Fehlstellung α		vertikale Fehlstellung β	
	Standard- abweichung σ_α	Mittelwert μ_α	Standard- abweichung σ_β	Mittelwert μ_β
linker Schleicher 8,50 m bis 10,75 m	0,1613°	-0,0857°	0,0767°	0,7402°
linker Schleicher 8,50 m bis 10,75 m Referenzmessung	0,0966°	0,3400°	0,0994°	0,7100°
rechter Schleicher 8,50 m bis 10,75 m	0,0947°	0,0109°	0,0934°	0,8834°
rechter Schleicher 8,50 m bis 10,75 m Referenzmessung	0,0483°	0,2700°	0,0949°	0,8700°

Die Abweichungen der Mittelwerte der horizontalen Fehlstellungen zeigen für den linken Schleicher mit $\Delta\alpha'_{\text{links,Kalib,Referenz}} \approx 0,42^\circ$ eine größere Abweichung im Vergleich zum rechten Schleicher mit $\Delta\alpha'_{\text{rechts,Kalib,Referenz}} \approx 0,26^\circ$. Für die komplette Distanz ist dieser Sachverhalt umgekehrt. Der systematische Fehler der horizontalen Fehlstellung wird als Mittelwert der Abweichungen zu $\Delta\alpha'_{\text{Kalib,Referenz,Serie}} \approx 0,34^\circ$ angenommen. Die Mittelwerte der vertikalen Fehlstellungen können mit $\mu'_{\beta,\text{links,Kalib}} = 0,7402^\circ$ und $\mu'_{\beta,\text{links,Referenz}} = 0,7100^\circ$ sowie $\mu'_{\beta,\text{rechts,Kalib}} = 0,8834^\circ$ und $\mu'_{\beta,\text{rechts,Referenz}} = 0,8700^\circ$ als identisch angenommen werden. Die präsentierten Daten sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Die Abbildung 6.19 verdeutlicht nochmals die Robustheit des Kalibrierverfahrens am Beispiel des linken Schleichers, indem die ursprünglich angenommene Datenmen-

ge von $N(11, 20) = 1.100$ Einzelergebnissen auf $N(11, 10) = 550$ Einzelergebnisse halbiert wird. Für beide Scheinwerfer verändern sich die Mittelwerte der Kalibrierergebnisse nicht, ebenso bleiben die Standardabweichungen im Entfernungsbereich zwischen 8,50 m und 10,75 m mit $\sigma''_{\alpha, \text{links, Kalib}} = 0,2045^\circ$, $\sigma''_{\beta, \text{links, Kalib}} = 0,0781^\circ$, $\sigma''_{\alpha, \text{rechts, Kalib}} = 0,1604^\circ$ und $\sigma''_{\beta, \text{rechts, Kalib}} = 0,1229^\circ$ vergleichbar zu den Erkenntnissen in Abschnitt 4.4.3.

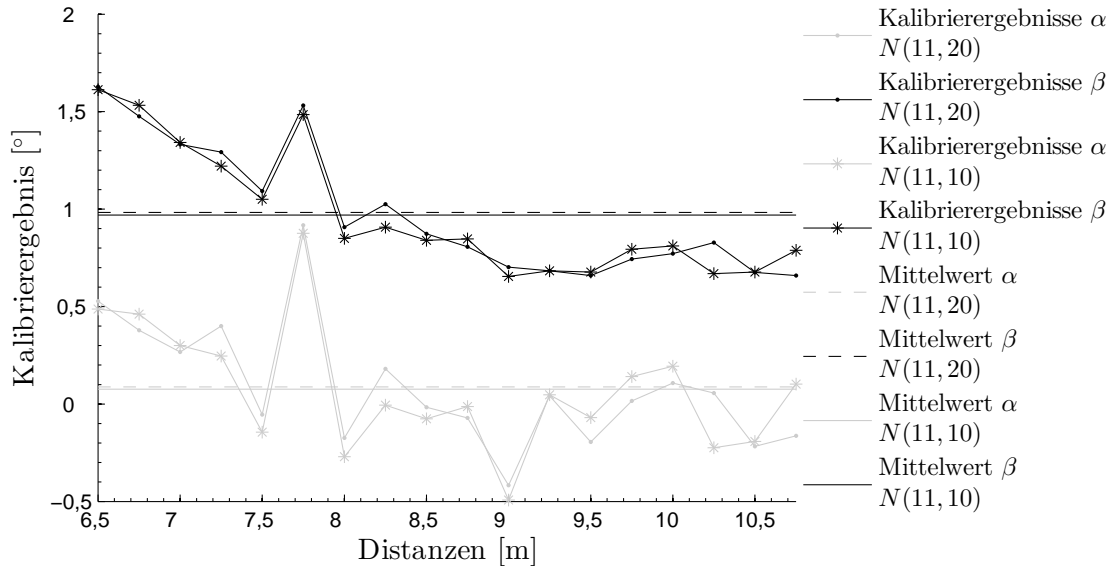


Abbildung 6.19: Vergleich der Kalibrierergebnisse des linken Scheinwerfers in verschiedenen Distanzen zwischen Projektionsfläche und Hinterachse auf der Basis der Gesamtanzahl an Einzelergebnissen

6.3.4 Untersuchung des Kalibrierverfahrens im Verkehrsraum

Die automatisierte Scheinwerfereinstellung auf Basis der aktiven Triangulation bietet die Möglichkeit, die Fehlstellung des Scheinwerfers auch im Fahrbetrieb zu bestimmen. Das System aktiviert sich im vorgestellten Versuchsträger für den Serienscheinwerfer in einem definierten Geschwindigkeitsbereich unterhalb von 10 km/h selbstständig, sobald die Kamera einen charakteristischen Punkt der HDG detektiert und die Einschaltbedingungen der Onlinekalibrierung erfüllt sind, Abschnitt 5.2.

Folglich wird eine Validierung des Systems im Verkehrsraum durchgeführt, wobei wechselnde Umfeldleuchtdichten, Distanzvariationen zwischen Hauptscheinwerfer und Projektionsfläche, Reflexionsänderungen der Projektionsfläche und geometrische Lage- und Formveränderungen der HDG auftreten.

Dynamische Kalibrierung im Verkehrsraum: Die Nutzung des Kalibrierverfahrens im Verkehrsraum beschränkt sich auf Szenen, in denen eine HDG vor dem Fahrzeug auf einer Projektionsfläche abgebildet wird. Als Hauptanwendungsorte werden Parkhäuser identifiziert, da dort weitestgehend Beleuchtungssituationen und Projektionsflächen vorhanden sind, die eine Erkennung der HDG möglich machen. Ebenso liegen die Geschwindigkeiten im Aktivierungsbereich des Systems. Weitere Kalibrierungsmöglichkeiten bestehen vor Garagen und Hauswänden. Die nachfolgenden Kalibrierungsergebnisse entstammen Situationen in einem Parkhaus mit mehreren Ebenen und wechselnden Lichtverhältnissen sowie Wänden mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften.

Für den Kalibrierprozess werden $N(11, 10) = 550$ Einzelergebnisse verwendet. Die Datenmenge ist nach Abschnitt 6.3.3 ausreichend für die Kalibrierung. Die Anordnung der charakteristischen Punkte entspricht den Angaben der vorangegangenen Abschnitte 6.3.1, 6.3.2 und 6.3.3. Unter Berücksichtigung der geometrischen Lageveränderung der HDG wird das in Abschnitt 6.2.3 eingeführte *LVQ-Verfahren* genutzt. Die bekannte Verlagerung der jeweiligen HDG wird horizontal und vertikal korrigiert, wobei drei HDG-Klassen genutzt werden. Hierbei wird darauf geachtet, dass die für die Klassifizierung notwendigen Trainingsdaten nicht in dem Testparkhaus generiert werden. Ebenso wird die aus Kapitel 4, Abschnitt 4.4.5, bekannte Variation der Fahrwinkel aktiviert.

Insgesamt werden zwanzig Kalibrierungen erfasst. Das System wird nur für den linken Hauptscheinwerfer angewendet, um die größtmögliche Leistungsfähigkeit der Kamera abrufen zu können. Die Ergebnisse und beispielhafte Szenen sind in Abbildung 6.20 dargestellt¹⁷. Die sich ergebenden Standardabweichungen zeigen trotz einer verringerten Anzahl an Einzelergebnissen mit $\sigma_{\alpha, \text{links, Kalib}} = 0,1682^\circ$ und $\sigma_{\beta, \text{links, Kalib}} = 0,1150^\circ$ eine Übereinstimmung zu den Messergebnissen unter Laborbedingungen, Abschnitt 6.3.3, Tabelle 6.4. Der Mittelwert der horizontalen Fehlstellung ist mit $\mu_{\alpha, \text{links, Kalib}} = 0,1169^\circ$ sehr nahe am Referenzwert mit $\mu_{\alpha, \text{links, Referenz}} = 0,2000^\circ$ im Vergleich zu dem Mittelwert der vertikalen Fehlstellung, der mit $\mu_{\beta, \text{links, Kalib}} = 0,7778^\circ$ im Vergleich zu dem Referenzwert mit $\mu_{\beta, \text{links, Referenz}} = 0,6350^\circ$ stärker abweicht. Es muss berücksichtigt werden, dass durch das *LVQ-Verfahren* die HDG-Klasse 3 in 75,94 % der Fälle, die HDG-Klasse 2 in 22,63 % der Fälle und die HDG-Klasse 1 in 1,43 % der Fälle detektiert werden. Von einer idealen Klassifizierung kann nicht ausgegangen werden, was die systematischen Abweichungen erklärt.

Ein Verzicht auf das Klassifizierungsverfahren ist nicht zu empfehlen, da sich für diesen Fall Standardabweichungen von $\sigma'_{\alpha, \text{links, Kalib}} = 0,2486^\circ$ und $\sigma'_{\beta, \text{links, Kalib}} = 0,2513^\circ$ bei einem mittleren Kalibrierergebnis von $\mu'_{\alpha, \text{links, Kalib}} = -0,4772^\circ$ und $\mu'_{\beta, \text{links, Kalib}} = 0,1994^\circ$ ergeben. Das System bleibt mit dem *LVQ-Verfahren* und den Winkel-Offsets beherrschbar. Die HDG-Klassen 3 und 1 bedürfen vordefinierter Winkel-Annahmen, wodurch eine finale Anpassung der gemittelten Ergebnisse möglich ist. Jedoch muss für eine solche Maßnahme von einer 100%igen Klassifizierung ausgegangen werden.

¹⁷Die x-Achse und die y-Achse in Abbildung 6.20 sind umgedreht, da die Fahrwinkel des Scheinwerfers nach oben und nach rechts negativ und nach unten und nach links positiv sind.

Durch eine verbesserte Zuordnung der HDG-Klassen ist folglich eine Verringerung der Systemtoleranz im Verkehrsraum absehbar und eine Annäherung der Mittelwerte möglich.

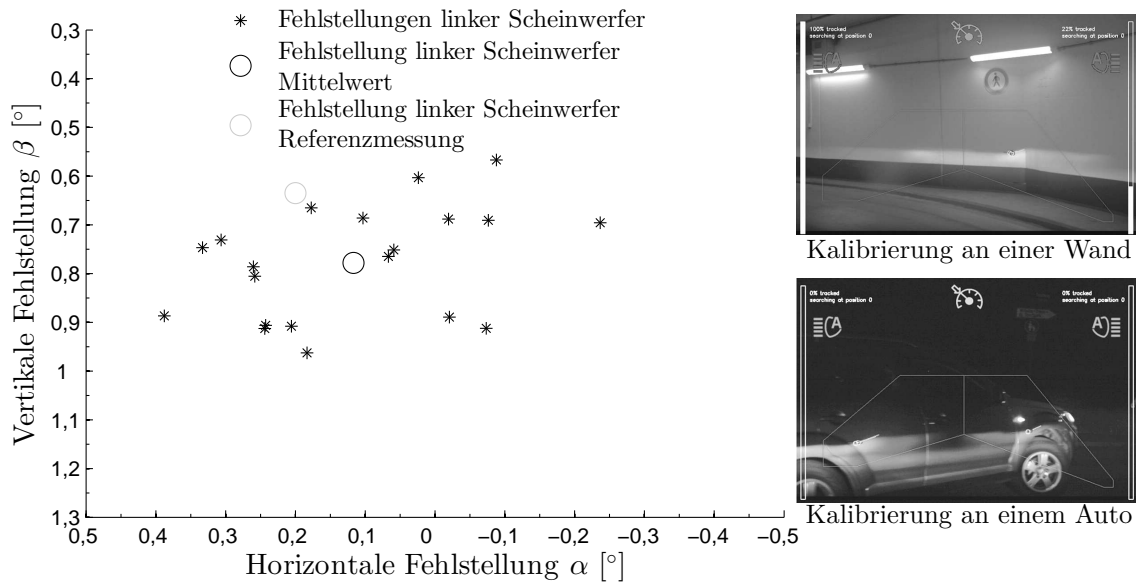


Abbildung 6.20: Darstellung der Kalibrierergebnisse für den linken Hauptscheinwerfer unter dynamischen Bedingungen

Charakteristika bei Kalibrierungen im Verkehrsraum und im Labor: Auf Basis der erhobenen Daten und der Messergebnisse aus Abschnitt 6.3.3 sind die Charakteristika statischer und dynamischer Kalibrierdurchläufe im Verkehrsraum und im Labor darstellbar. Die Kalibrierergebnisse im Verkehrsraum werden auf Basis der beiden Abbildungen 6.21 und 6.22 mit jeweils zwei der elf charakteristischen Punkte den Ergebnissen aus dem Labor gegenübergestellt.

In Abbildung 6.21 wird ein Vergleich zwischen einer Kalibrierung unter dynamischen Bedingungen im Verkehrsraum (schwarz) und statischen Bedingungen im Labor (grau) aufgezeigt. Die dargestellten Zusammenhänge sind charakteristisch für den jeweiligen Fall. Im statischen Fall bleiben die detektierten Pixelpositionen eines charakteristischen Punkts ortsfest auf dem Kamerabild. Im dynamischen Fall hingegen bildet sich eine Gerade, die für den linken Scheinwerfer vom linken unteren Kamerabildbereich in den rechten oberen Bildbereich verläuft, vergleiche Abschnitt 5.2.1. Die angefügten Bilder illustrieren die jeweilige Szene. In Abbildung 6.22 werden beide Kalibrierprozesse in Bewegung ausgeführt, die Bilder stellen die Kantendarstellung im Verkehrsraum und im Labor dar. Die Szene des Verkehrsraums zeigt nochmals anschaulich die beiden HDGs und den damit verbundenen Winkelversatz. Die Daten aus dem Labor liefern in 100 %¹⁸, bzw. 84 %¹⁹ der Fälle die HDG-Klasse 2, für die keine Winkel-Offsets genutzt werden.

¹⁸Daten aus dem Labor für statische Bedingungen, Abbildung 6.21 (grau).

¹⁹Daten aus dem Labor für dynamische Bedingungen, Abbildung 6.22 (grau).

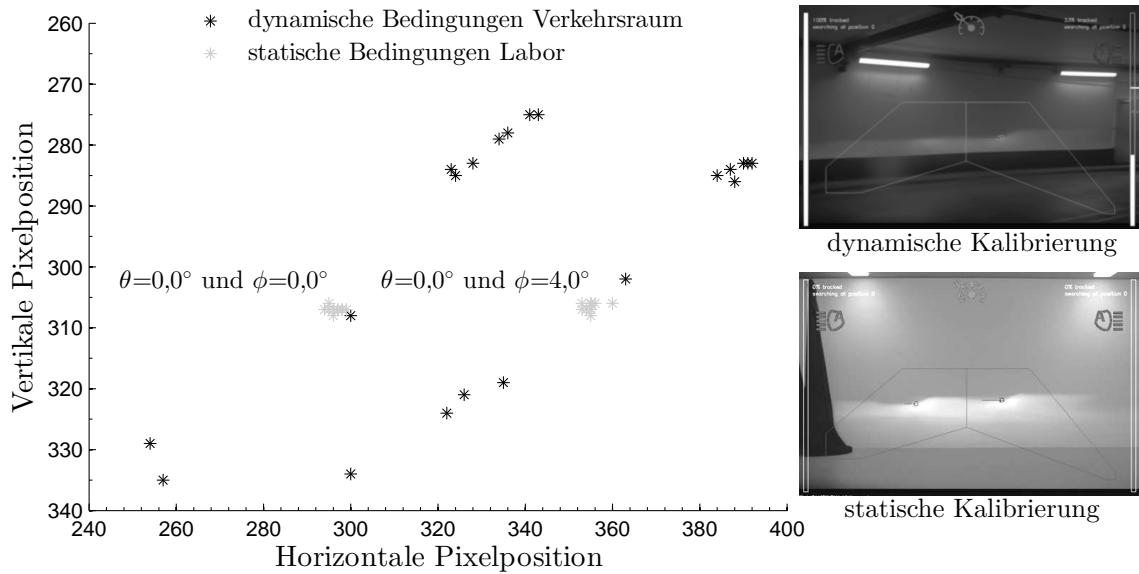


Abbildung 6.21: Vergleich der Pixelpositionen zweier charakteristischer Punkte auf dem Kamerabild für eine dynamische Kalibrierung im Verkehrsraum (schwarz) und eine statische Kalibrierung im Labor (grau)

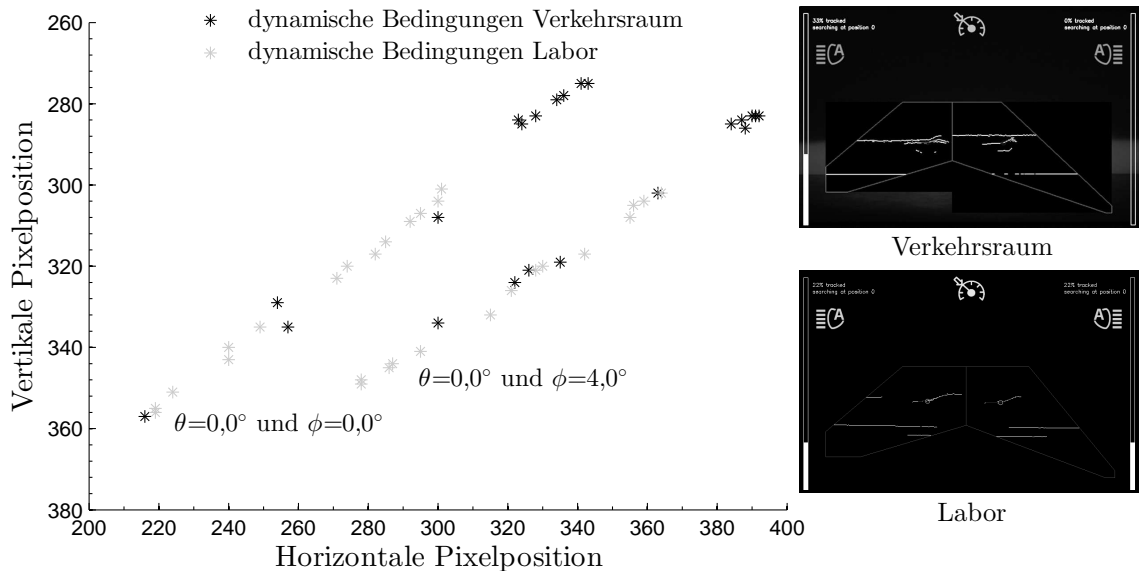


Abbildung 6.22: Vergleich der Pixelpositionen zweier charakteristischer Punkte auf dem Kamerabild für eine dynamische Kalibrierung im Verkehrsraum (schwarz) und im Labor (grau)

Umgekehrt sind 59 % der detektierten charakteristischen Punkte im Verkehrsraum der HDG-Klasse 3 zuzuordnen. Auf der Grundlage dieser Klassifizierungsrate für die HDG-Klasse 3 im Verkehrsraum und einer Häufung der Punkte im oberen rechten Drittel des Kamerabilds, Abbildung 6.22, kann tendenziell davon ausgegangen werden, dass die Veränderung der geometrischen Orientierung im größeren Entfernungsbereich in Erscheinung tritt. Allerdings ist dies kein Ansatz für eine Klassifizierung auf Basis der Pixelposition auf dem Kamerabild. Berücksichtigt werden muss eine mögliche andere Fehlstellung, womit der angesprochene Kamerabereich einer geringen Entfernung und womöglich einer anderen HDG-Klasse entsprechen kann.

6.4 Adaption des Kalibrierverfahrens auf einen Matrixscheinwerfer

Die Ausführungen aus Abschnitt 6.3 zeigen eine Anwendbarkeit der automatisierten Scheinwerfereinstellung für einen Serienscheinwerfer in unterschiedlichen Szenarien. Im Hinblick auf den flexiblen Einsatz des Kalibrierverfahrens für verschiedene Scheinwerfertechnologien wird eine Nutzung des Systems bei einem Prototypenscheinwerfer untersucht. Der Fokus liegt diesbezüglich auf systembedingten Anpassungen, Abschnitt 6.4.1, sowie dem Verhalten der Kalibrierergebnisse unter statischen und dynamischen Bedingungen, Abschnitte 6.4.2 und 6.4.3.

6.4.1 Anpassungen im Kalibrierablauf

Das Grundprinzip der vorgestellten Onlinekalibrierung liegt in der Zuordnung der detektierten charakteristischen Punkte durch das Kamerasystem zu den Verfahrenswinkeln des Scheinwerfers. Bei dem Prototypenscheinwerfer werden die unterschiedlichen Verfahrenswinkel durch das Dimmen definierter LED-Pixel-Segmente umgesetzt. Ein charakteristischer Punkt wird folglich nicht mehr durch einen Verfahrenswinkel generiert, sondern vielmehr durch eine definierte Anordnung gedimmter LED-Pixel-Segmente, siehe hierzu Tabelle 6.5 und Abbildung 6.23.

Tabelle 6.5: Segmentgrenzen der charakteristischen Positionen des Scheinwerfers

Segmentgrenze [°]	Charakteristische Positionen des Scheinwerfers					
	1	2	3	4	5	6
ϕ	0,0°	4,8°	3,6°	2,4°	1,2°	-1,2°
θ	0,0°	0,0°	0,0°	0,0°	0,0°	0,0°
	7	8	9			
ϕ	-2,4°	-3,6°	-4,8°			
θ	0,0°	0,0°	0,0°			

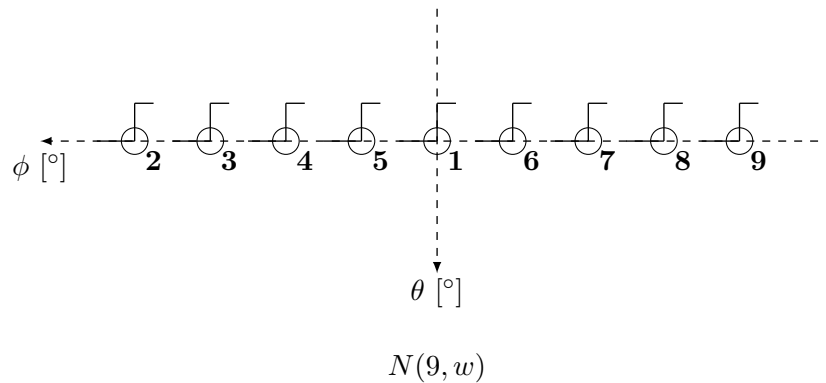


Abbildung 6.23: Schematische Darstellung der Segmentgrenzen des Prototypenscheinwerfers mit Blick auf die Projektionsfläche

Der H0V0-Punkt der HDG wird weiterhin durch einen Schnittpunkt zwischen der Horizontalen und dem Anstieg rechts der Horizontalen mit Blick auf die Projektionsfläche gebildet. Lediglich der Schnittwinkel, der bei Serienscheinwerfern zwischen 15° und 45° liegt, ändert sich zu 90° , siehe hierzu Abschnitt 6.1.2, Abbildung 6.2. Dieser Sachverhalt bedingt eine Änderung der Parameter der *Hough-Transformation* für den absoluten Winkel und für die Länge des Anstiegs, Abschnitt 5.1.2. Ebenso sind geringfügige Anpassungen in den Bildverarbeitungsteilen notwendig, die die Filterwerte der adaptiven Kontrastanpassung, Abschnitt 5.1.1, und die Parameter des *Otsu-Canny-Algorithmus*, Abschnitt 5.1.2, betreffen. Die Lichtverteilung des Prototypenscheinwerfers ist im Vergleich zum Serienscheinwerfer durch die abgegrenzten LED-Segmente inhomogener, hat aber eine schärfere HDG.

Die Parameter der verschiedenen ROIs sind anzupassen, da sich der Prototypenscheinwerfer im Vergleich zum Serienscheinwerfer in einem anderen Versuchsträger befindet, womit veränderte geometrische Relationen zwischen Scheinwerfer und Kamera bestehen. Eine Übernahme der neuen Anbaupositionen der Scheinwerfer und der Kamera sowie der Kamerakalibriermatrix ist ebenfalls vorzuhalten.

Im Systemablauf muss berücksichtigt werden, dass der Prototypenscheinwerfer im Vergleich zum Serienscheinwerfer keine Rückmeldung darüber gibt, dass das vordefinierte Lichtbild zur Verfügung steht. Bei dem LED-Scheinwerfer ist diese Information durch ein logisches CAN-Signal gegeben. Der Lösungsansatz für den Prototypenscheinwerfer sieht ein zeitversetztes Tracking (40 ms) des charakteristischen Punkts vor, wodurch die notwendige Zuordnung erreicht wird. Im Hinblick auf die möglichen charakteristischen Punkte ist lediglich eine horizontale Veränderung der H0V0-Punkte möglich. Eine Stellmotorik wird nicht genutzt. Unter Berücksichtigung der simulativen Ergebnisse aus Abschnitt 4.4 und der ersten experimentellen Ergebnisse aus Abschnitt 6.3 entsteht hierdurch ein Nachteil gegenüber dem Serienscheinwerfer. Die herausgestellte diagonale Verknüpfung der charakteristischen Punkte, Abschnitt 6.3.2, ist nicht möglich. Gleiches gilt für die Variation der Verfahrpositionen, Abschnitt 4.4.5.

Vorteilhaft ist für die Anwendung des Kalibrierverfahrens bei dem Prototypenscheinwerfer die subjektiv schärfer ausgeprägte HDG mit geringerem Farbsaum und der

durch einen 90° -Knick in der HDG erzeugte H0V0-Punkt. Dadurch sind die horizontalen Trackingtoleranzen des Prototypenscheinwerfers im Vergleich zum Serienscheinwerfer geringer, siehe hierzu die Abbildungen B.11 und B.12 im Anhang B.2.2.

6.4.2 Untersuchungen unter statischen Bedingungen

Die experimentellen Betrachtungen zum Prototypenscheinwerfer umfassen die aus Abschnitt 6.3.3 bekannte Untersuchung des Einfluss der unterschiedlichen Kalibrierdistanzen. Berücksichtigt werden muss, dass das Versuchsfahrzeug in diesem Kontext einen Abstand von ungefähr 3,5 m zwischen Hinterachse und Scheinwerfer besitzt. Die resultierenden Entfernungen zwischen Scheinwerfer und Projektionsfläche sind vergleichbar mit den Distanzen, die für den Serienscheinwerfer, Abbildungen 6.17 und 6.18, untersucht werden. Die Abstände, die eine HDG-Erkennung ermöglichen, werden auch bei dem Prototypenscheinwerfer durch die Bildverarbeitung bestimmt. Allgemein ist die HDG des Serienscheinwerfers im Vergleich zur HDG des Prototypenscheinwerfers bei kleineren Entfernungen besser zu erkennen, da der vertikale Anstieg der HDG länger ist. Bei größeren Abständen ist dieser Sachverhalt umgekehrt, da die HDG des Prototypenscheinwerfers schärfer ist. Die sich ergebenden Messergebnisse sind für den linken Scheinwerfer in Abbildung 6.24 und für den rechten Scheinwerfer in Abbildung 6.25 dargestellt.

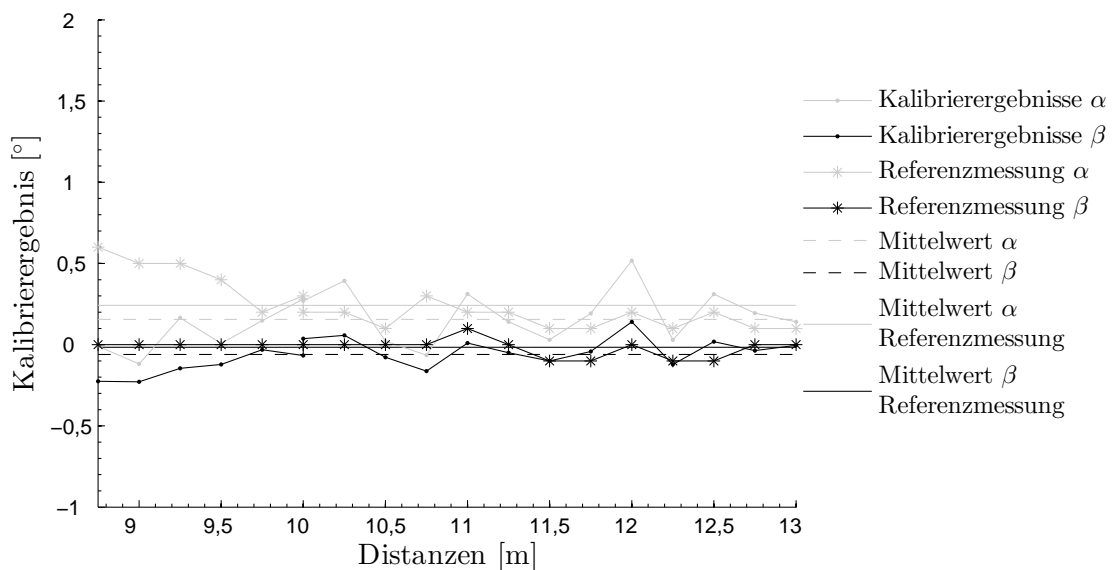


Abbildung 6.24: Kalibrierergebnisse des linken Prototypenscheinwerfers in verschiedenen Distanzen zwischen Projektionsfläche und Hinterachse im Vergleich zu den Referenzmessungen

In beiden Darstellungen wird das jeweilige Kalibrierergebnis der statischen Situation mit der Referenzmessung verglichen. Der Kalibrierablauf basiert auf neun charakteristischen Punkten mit einer Wiederholrate von $w = 28$. Die Anzahl der Einzelergeb-

nisse ist mit $N(9, 28) = 1.008$ vergleichbar zu den Angaben in Abschnitt 6.3.3. Für den linken Scheinwerfer ergeben sich die Mittelwerte zu $\mu_{\alpha, \text{links, Kalib}} = 0,1560^\circ$ im Vergleich zu $\mu_{\alpha, \text{links, Referenz}} = 0,2421^\circ$ und zu $\mu_{\beta, \text{links, Kalib}} = -0,0605^\circ$ im Vergleich zu $\mu_{\beta, \text{links, Referenz}} = -0,0158^\circ$ sowie die Standardabweichung von $\sigma_{\alpha, \text{links, Kalib}} = 0,1650^\circ$ im Vergleich zu $\sigma_{\alpha, \text{links, Referenz}} = 0,1539^\circ$ und $\sigma_{\beta, \text{links, Kalib}} = 0,0951^\circ$ im Vergleich zu $\sigma_{\beta, \text{links, Referenz}} = 0,0501^\circ$ und zeigen die Konstanz der Ergebnisse über die Distanz. Beim rechten Scheinwerfer sind die Standardabweichungen mit $\sigma_{\alpha, \text{rechts, Kalib}} = 0.1488^\circ$ im Vergleich zu $\sigma_{\alpha, \text{rechts, Referenz}} = 0.1437^\circ$ und $\sigma_{\beta, \text{rechts, Kalib}} = 0,0635^\circ$ im Vergleich zu $\sigma_{\beta, \text{rechts, Referenz}} = 0,0562^\circ$ geringfügig besser.

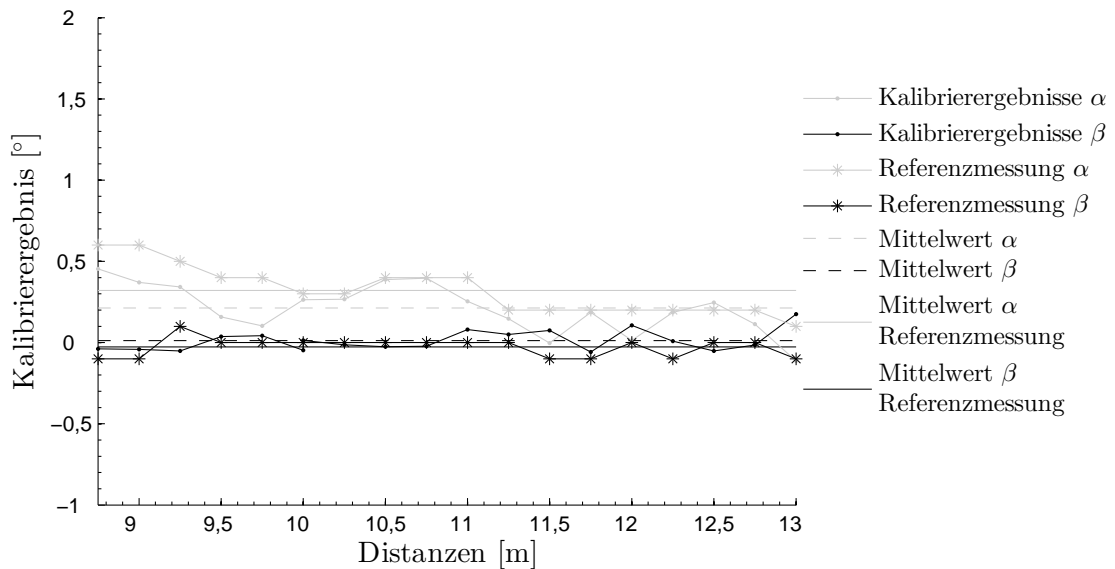


Abbildung 6.25: Kalibrierergebnisse des rechten Prototypenscheinwerfers in verschiedenen Distanzen zwischen Projektionsfläche und Hinterachse im Vergleich zu den Referenzmessungen

Im Vergleich zu den in Abschnitt 6.3.3 auftretenden größeren Abweichungen $\Delta\alpha'_{\text{Kalib, Referenz, Serie}} \approx 0,34^\circ$ der horizontalen Fehlstellung zwischen dem Kalibrierergebnis und der Referenzmessung sind etwaige Abweichungen beim Prototypenscheinwerfersystem deutlich geringer $\Delta\alpha_{\text{Kalib, Referenz, MXB, statisch}} \approx 0,1^\circ$. Der mögliche Hauptgrund für diesen Umstand besteht, wie bereits in Abschnitt 6.3.3 angedeutet, in der Erzeugung des Knickpunkts durch die Horizontale und den Anstieg. Beim Prototypenscheinwerfer ist durch den 90° -Knick eine eindeutigere Zuordnung des Knickpunkts möglich. Folglich liegen subjektive Bewertung und Kalibrierverfahren auf Basis der horizontalen Fehlstellung näher zusammen.

Die beim Serienscheinwerfer beobachtete Verschiebung der geometrischen Orientierung der HDG, Abschnitt 6.2.3, ist messtechnisch nicht nachweisbar und auf den deutlich geringer ausgeprägten Farbsaum des Scheinwerfers zurückzuführen. Die bestimmten Standardabweichungen, Tabelle 6.6, bestätigen die Ergebnisse mit dem Serienscheinwerfer, Abschnitt 6.3.3, nochmals und zeigen die Anwendbarkeit der vor-

gestellten automatisierten Scheinwerfereinstellung auch für das Prototypenscheinwerfersystem.

Tabelle 6.6: Ergebnisse für den Prototypenscheinwerfer in statischen Situationen

Szenarien mit Prototyp	horizontale Fehlstellung α		vertikale Fehlstellung β	
	Standardabweichung σ_α	Mittelwert μ_α	Standardabweichung σ_β	Mittelwert μ_β
linker Scheinwerfer 8,75 m bis 13,00 m	0,1650°	0,1560°	0,0951°	-0,0605°
linker Scheinwerfer 8,75 m bis 13,00 m Referenzmessung	0,1539°	0,2421°	0,0501°	-0,0158°
rechter Scheinwerfer 8,75 m bis 13,00 m	0,1488°	0,2125°	0,0635°	0,0116°
rechter Scheinwerfer 8,75 m bis 13,00 m Referenzmessung	0,1437°	0,3211°	0,0562°	-0,0263°

6.4.3 Untersuchungen unter dynamischen Bedingungen

Die Untersuchungen zum Verhalten der automatisierten Scheinwerfereinstellung bei dem Prototypenscheinwerfer unter dynamischen Bedingungen bilden den Abschluss der experimentellen Betrachtungen. Entsprechend den Erkenntnissen des Kalibrierverfahrens des Serienscheinwerfers im Verkehrsraum, Abschnitt 6.3.4, wird die Onlinelibrierung des Prototypenscheinwerfers unter wechselnden Geometriebeziehungen zwischen Projektionsfläche und Hauptscheinwerfer ausgeführt. Die Projektionsflächen liegen in Form von grauen Wänden in einem Parkhaus auf dem Prüfgelände in Weissach vor. Das Fahrzeug wird während der Durchführung der Kalibrierung im Parkhaus bewegt. Die Lichtverhältnisse sind durch die Parkhausbeleuchtung konstant. Insgesamt wird der linke Hauptscheinwerfer 20-mal kalibriert, wobei die Anzahl der genutzten Einzelergebnisse mit $N(9, 14) = 504$ vergleichbar zu den Ausführungen mit dem Serienscheinwerfer in Abschnitt 6.3.4 ist.

Die Kalibrierergebnisse der berechneten Mittelwerte der horizontalen und vertikalen Fehlstellungen mit $\mu_{\alpha, \text{links, Kalib}} = -0,1065^\circ$ und $\mu_{\beta, \text{links, Kalib}} = 0,0077^\circ$ und einer Referenzmessung mit den Werten $\mu_{\alpha, \text{links, Referenz}} = 0,1000^\circ$ und $\mu_{\beta, \text{links, Referenz}} = 0,0000^\circ$ sind in Abbildung 6.26 dargestellt²⁰. Die Standardabweichungen sind mit $\sigma_{\alpha, \text{links, Kalib}} = 0,1733^\circ$ für die horizontale Fehlstellung und mit $\sigma_{\beta, \text{links, Kalib}} = 0,0826^\circ$

²⁰Die x-Achse und die y-Achse in Abbildung 6.26 sind umgedreht, da die Verfahrenswinkel des Scheinwerfers nach oben und nach rechts negativ und nach unten und nach links positiv sind.

für die vertikale Fehlstellung vergleichbar zu den Ergebnissen der statischen Untersuchungen, Abschnitt 6.4.2, Tabelle 6.6, und zeigen auch unter diesen Umständen eine Anwendbarkeit des Kalibrierverfahrens.

Auffällig ist wiederum die Abweichung der subjektiv bestimmten horizontalen Fehlstellung zu der berechneten Fehlstellung mit $\Delta\alpha_{\text{Kalib,Referenz,MXB,dynamisch}} \approx 0,2^\circ$. Auch in diesem Fall liegt die Referenzmessung in Blickrichtung des Scheinwerfers auf die Fläche links von der berechneten horizontalen Fehlstellung, was bereits aus Abschnitt 6.3.3 mit $\Delta\alpha'_{\text{Kalib,Referenz,Serie}} \approx 0,34^\circ$ bekannt ist. Unter statischen Bedingungen ist dieser systematische Fehler für den Prototypenscheinwerfer lediglich durch geringe Abweichungen $\Delta\alpha_{\text{Kalib,Referenz,MXB,statich}} \approx 0,1^\circ$ zu erkennen.

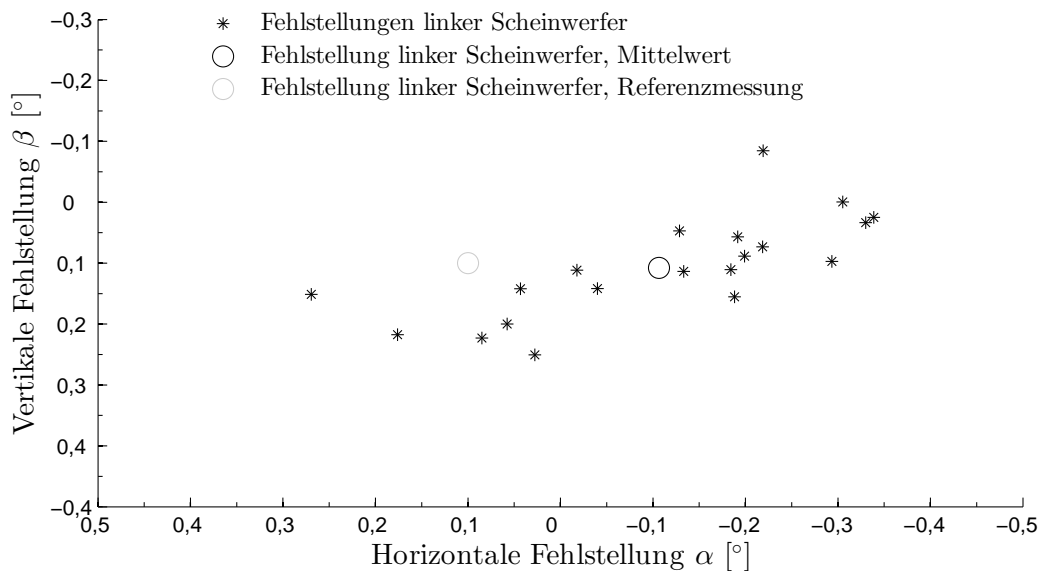


Abbildung 6.26: Darstellung der Kalibrierergebnisse für den linken Hauptscheinwerfer unter dynamischen Bedingungen

Die Pixelpositionen von zwei unterschiedlichen charakteristischen Punkten eines Kalibrierablaufs sind für eine Kalibrierung unter dynamischen (schwarz) und statischen (grau) Bedingungen in Abbildung 6.27 dargestellt. Von einer identischen Grundeinstellung des Scheinwerfers wird ausgegangen. Unter dynamischen Bedingungen ist zu erkennen, dass die detektierten Pixelpositionen im Vergleich zum statischen Fall weiter rechts liegen, wodurch die Richtung der Abweichung zwischen der berechneten horizontalen Fehlstellung für den dynamischen Fall im Vergleich zu der berechneten horizontalen Fehlstellung für den statischen Fall erklärbar ist. Die Ursache für diesen systematischen Fehler liegt demnach im Bereich der Bildverarbeitung, wobei ein möglicher Ansatzpunkt die Bestimmung des Clusterzentrums bei der Plausibilitätsprüfung und dem Tracking ist, Abschnitt 5.2.1. Ebenso kann eine geringfügige Veränderung der HDG in der statischen Szene im Vergleich zu der HDG im Verkehrsraum zu der Differenz führen. Ein erster Lösungsansatz sieht vor, den systematischen Fehler durch einen Winkel-Offset zu korrigieren, falls eine Bewegung detektiert wird, was nachweislich durch die Darstellung in Abbildung 6.27 möglich

ist. Alternativ muss in der Kantendarstellung der HDG der Anstieg näher betrachtet werden, da dessen Form maßgeblich den detektierten charakteristischen Punkt beschreibt. Eine Korrelation mit einer vordefinierten Form der HDG kann eingesetzt werden, um die Reproduzierbarkeit der Erkennung zu steigern, siehe hierzu [61].

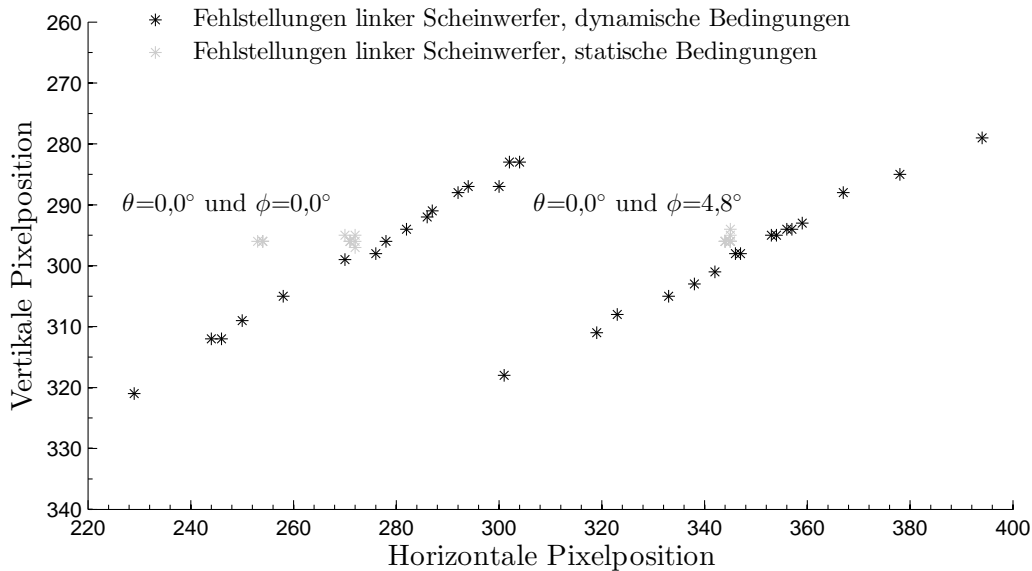


Abbildung 6.27: Vergleich der Pixelpositionen zweier charakteristischer Punkte des Prototypenscheinwerfers auf dem Kamerabild für eine dynamische Kalibrierung im Parkhaus (schwarz) und eine statische Kalibrierung im Labor (grau)

6.5 Diskussion der experimentellen Untersuchungsergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen der vorgestellten automatisierten Scheinwerfereinstellung zeigen die Nutzung von Kamerainformationen zur Bestimmung der Scheinwerferfehlstellung und die breite Anwendbarkeit des Kalibrierverfahrens. Zudem können grundlegende Aussagen zur Durchführung des Kalibrierverfahrens festgehalten werden.

Die Kamerainformationen zur Angabe der relativen Lage des H0V0-Punkts bilden die Grundlage der Onlinekalibrierung. Auf Basis dieses charakteristischen Punkts wird auf die geometrische Lage der HDG geschlossen. In den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 kann nachgewiesen werden, dass der durch die Kamera erkannte H0V0-Punkt mit dem lichttechnisch sowie subjektiv bestimmten H0V0-Punkt übereinstimmt. Folglich ist der Ansatz korrekt, die Einstellung des Hauptscheinwerfers aus den Kamerainformationen zu beziehen.

Im Hinblick auf die Anwendbarkeit des Kalibrierverfahrens kann festgehalten werden, dass unter verschiedensten Umfeldbedingungen sowie statischen und dynami-

schen Kalibrierbedingungen für den Serienscheinwerfer nahezu gleiche Ergebnisse hinsichtlich der Standardabweichungen und der Mittelwerte erreicht werden, vergleiche hierzu die Abschnitte 6.3.1, 6.3.3 und 6.3.4. Für den Prototypenscheinwerfer ist diese Aussage ebenfalls gültig, Abschnitte 6.4.2 und 6.4.3. Der automatisierten Scheinwerfereinstellung kann in Bezug auf die horizontale und die vertikale Bestimmung der Fehlstellungen im Mittel eine Standardabweichung von $0,1^\circ$ zugeordnet werden.

Der Vergleich der Kalibrierergebnisse zwischen der automatisierten Scheinwerfereinstellung in den unterschiedlichsten Szenen, Abschnitte 6.3 und 6.4, und der visuell-manuellen Methode unter definierten Bedingungen, Abschnitt 6.2.1, zeigt, dass das aktive Triangulationsverfahren nahezu identische Resultate erzielt. Unter Berücksichtigung der indirekten Leuchtdichtemessung, Abschnitt 6.2.2, als alternative Möglichkeit, die Einstellung der Scheinwerfer zu bestimmen, sind die Ergebnisse der automatisierten Scheinwerfereinstellung geringfügig schlechter. Jedoch muss beachtet werden, dass sowohl die visuell-manuelle Methode als auch die indirekte Leuchtdichtemessung nur statisch ausgeführt werden können. Die Unsicherheit der Positionierung des Fahrzeugs vor der Projektionsfläche geht nicht in die Gesamtbewertung der Messgenauigkeit ein. Folglich kann im Kontext einer vollständigen Bestimmung der Scheinwerfereinstellung mit den etablierten Methoden von einer größeren Unsicherheit ausgegangen werden. Bei der automatisierten Scheinwerfereinstellung hingegen wird der vollständige Kalibrierprozess erfasst.

Ableitbar sind drei grundlegende Aussagen zur Durchführung der Onlinekalibrierung. Die erste Bemerkung thematisiert den Umgang mit der Veränderung der geometrischen Orientierung der HDG beim Serienscheinwerfer, Abschnitt 6.2.3. Das *LVQ-Verfahren* zeigt bei den Untersuchungen im Verkehrsraum, Abschnitt 6.3.4, erste Erfolge, wodurch eine breitere Systemanwendung ermöglicht wird. Allerdings muss die erweiterte Anwendbarkeit im Verhältnis zum notwendigen Aufwand bei der Generierung der Trainingsdaten betrachtet werden. Bei dem Prototypenscheinwerfer entfällt diese Betrachtung, da die HDG keine Lageveränderung zeigt.

Die zweite Aussage umfasst das Zusammenspiel zwischen der Trackingtoleranz des H0V0-Punkts durch die Bildverarbeitung und den erforderlichen Verfahrenswinkeln des Scheinwerfers. Bei dem Serienscheinwerfer kann im Vergleich zum Prototypenscheinwerfer eine größere Abweichung bei der Erkennung der charakteristischen Punkte festgestellt werden, Anhang B.2.2. Umgekehrt ist bei dem Prototypenscheinwerfer eine geringere Flexibilität hinsichtlich der Verlagerung der charakteristischen Punkte gegeben, Abschnitt 6.1.2. Unter Berücksichtigung der statischen und dynamischen Untersuchungen sind vergleichbare Standardabweichungen erkennbar, Abschnitte 6.3.3 und 6.3.4 sowie 6.4.2 und 6.4.3. Der Schluss liegt nahe, dass eine Punkterkennung mit einer größeren Toleranz durch eine flexiblere Verlagerung des Lichtbilds kompensiert werden kann. Umgekehrt muss bei Scheinwerfersystemen mit weniger Spielraum hinsichtlich der Anordnung der charakteristischen Punkte auf eine höhere Genauigkeit bei der Erkennung der H0V0-Punkte geachtet werden.

Die dritte Aussage betrifft die Anzahl der charakteristischen Punkte und die Wiederholrate des Kalibrierprozesses. Auf Basis der in Abschnitt 6.3.2 dargestellten Ergebnisse kann die Schlussfolgerung getroffen werden, dass eine erhöhte Wiederholrate nur bedingt die Anzahl der charakteristischen Punkte senkt. Vielmehr ist auf die Anordnung der charakteristischen Punkte zueinander zu achten. In diesem Fall ist eine Erhöhung der Wiederholrate zugunsten einer Reduzierung der charakteristischen Punkte zulässig.

7 Empfehlungen für die Serienumsetzung

Die Untersuchungen aus Kapitel 6 zeigen, dass die automatisierte Scheinwerfereinstellung im Zuge des prototypischen Aufbaus die reproduzierbare Bestimmung der Scheinwerferfehlstellungen ermöglicht. Entsprechend werden auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse Empfehlungen für die Serienumsetzung des Systems abgeleitet.

7.1 Anforderungsanalyse und Parametrierung der Kalibrierung

Die Durchführung der Kalibrierung ist im Vorfeld zu spezifizieren, um einen optimalen Ablauf der automatisierten Scheinwerfereinstellung zu gewährleisten.

Kalibrierung in der Produktionslinie und in den Werkstätten: Die Hauptanforderung für eine Kalibrierung in der Produktionslinie oder in den Werkstätten liegt in der kurzen Dauer des Kalibrierablaufs. Weitaus weniger wichtig scheinen in diesem Kontext die Unsichtbarkeit des Kalibrierablaufs und die stark wechselnden Umfeldbedingungen. Die finale Applikation sieht in diesem Fall eine erhöhte Anzahl an charakteristischen Punkten p bei einer geringen Wiederholrate w vor, was den Ablauf aufgrund der Kombinatorik, Abschnitt 4.4.1, deutlich beschleunigt. Das Tracking kann im Zuge der statischen Situationen mit Fokus auf eine erhöhte Dichteverbundenheit der H0V0-Punkte parametrierbar werden, Abschnitt 5.2.1. Der Start des Kalibrierverfahrens ist über das Kombiinstrument oder über die Diagnoseschnittstelle möglich.

Onlinekalibrierung im Fahrbetrieb: Die Rahmenbedingungen sind für eine Kalibrierung im Fahrbetrieb anders priorisiert. Die Dauer eines Kalibrierverfahrens kann, gemessen an der Kilometerleistung, über mehrere 100 km bis 1.000 km betragen, Abschnitt 3.1.3. Jedoch ist der Ablauf der Kalibrierung so zu gestalten, dass dieser für den Fahrzeugführer nicht wahrnehmbar ist. Die Anzahl an charakteristischen Positionen p bzw. die Anzahl der Positionsänderungen ist dementsprechend gering zu halten, was eine erhöhte Wiederholrate w verlangt, Abschnitt 4.4.3. Ebenso ist eine geschickte Wahl der charakteristischen Punkte für die Toleranz der automatisierten Scheinwerfereinstellung von Bedeutung, Abschnitt 6.3.2. Final muss unter Berücksichtigung der stark wechselnden Umfeldbedingungen und der Farbeffekte

des Scheinwerfers die konstante geometrische Orientierung der HDG gewährleistet werden. Abhilfe schafft hierbei das in Abschnitt 6.2.3 beschriebene Klassifizierungsverfahren. Die Aktivierung der Kalibrierung wird unter anderem über eine Geschwindigkeitsschwelle und den Kamerastatus definiert, Abschnitt 5.2.2.

7.2 Teststrategie

Die automatisierte Scheinwerfereinstellung beinhaltet drei große Bereiche: den Bildverarbeitungsanteil für die Erkennung der H0V0-Punkte, die Ablaufsteuerung der Scheinwerfer und den Berechnungskern.

Einzel- und Integrationstest: Im Zuge der Einzel- und der Integrationstests sind die einzelnen Komponenten auf deren Funktion zu testen. Für die HDG-Erkennung ist es möglich, die Trackingtoleranz zu bestimmen und damit die Funktionalität der Bildverarbeitung zu überprüfen, Abbildungen B.10, B.11 und B.12, Anhang B.2.2. Für die Kontrolle der Ablaufsteuerung können die notwendigen Parameter zur Initialisierung des Kalibrierprozesses simuliert werden, wodurch die Scheinwerferbewegungen ausführbar sind. Der Berechnungskern ist ebenfalls über Testvektoren zu verifizieren. Die Generierung der Testvektoren kann in einem ersten Schritt simulativ erfolgen, Abschnitt 4.2.3. In einem zweiten Schritt ist es möglich, auf Basis der gespeicherten Messergebnisse, Abschnitt 6.1.1 und Anhang C.2, die Berechnung offline nochmals durchzuführen.

Systemtest: Der Systemtest umfasst die Fusion aller drei Bereiche zu einem Gesamtsystem. Über das in Abschnitt 6.1.3 angegebene Referenzmessverfahren besteht die Möglichkeit, die Gesamtsystemergebnisse hinsichtlich der Korrektheit und der erzielten Toleranz zu bewerten. Abschließend ist die Leistungsfähigkeit des Systems bezüglich der Laufzeit und etwaiger Quereffekte auf andere Funktionen des Steuergeräts zu prüfen.

7.3 Zielarchitektur

Die etablierte Architektur der kamerabasierten Lichtsysteme, Abbildung 7.1, wird durch die automatisierte Scheinwerfereinstellung ergänzt, Abbildung 7.2, wodurch ein flexibler Einsatz in Kombination mit den verschiedenen kamerabasierten Lichtfunktionen, Abschnitt 2.3, gegeben ist. Das Grundprinzip der Kalibrierung, Abschnitt 3.2.3, macht einen Informationsaustausch zwischen der automatisierten Scheinwerfereinstellung, der Kamera und dem Lichtalgorithmus notwendig. Die bekannte Sensor-Aktor-Beziehung wird folglich erweitert.

Im Hinblick auf den Einsatz eines hochintegrierten Steuergeräts, welches die Objekterkennung und den Lichtalgorithmus beinhaltet, sind die Komponenten der Schein-

werfereinstellung auf die verfügbaren Prozessoren zu verteilen, Abbildung 7.3. Die adaptive Bildverarbeitung wird auf dem Prozessor umgesetzt, der für die Objekterkennung genutzt wird, da hier die nötigen Operationen verfügbar sind. Der finale Systemablauf ist in Abbildung 7.4 vollständig dargestellt und fasst die einzelnen Systemkomponenten aus den Abschnitten 5.1, 5.2 und 5.3 nochmals zusammen. Zusätzlich werden die Schnittstellen zu dem Lichtalgorithmus und der Fahrerassistenzkamera gezeigt.

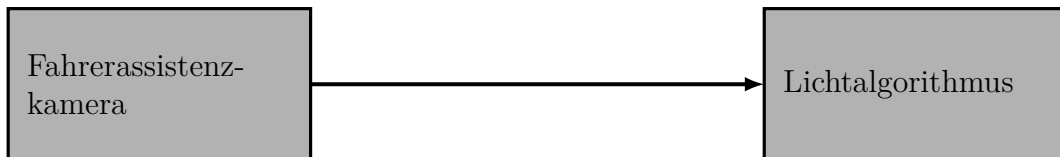


Abbildung 7.1: Systemarchitektur etablierter kamerabasierter Lichtsysteme

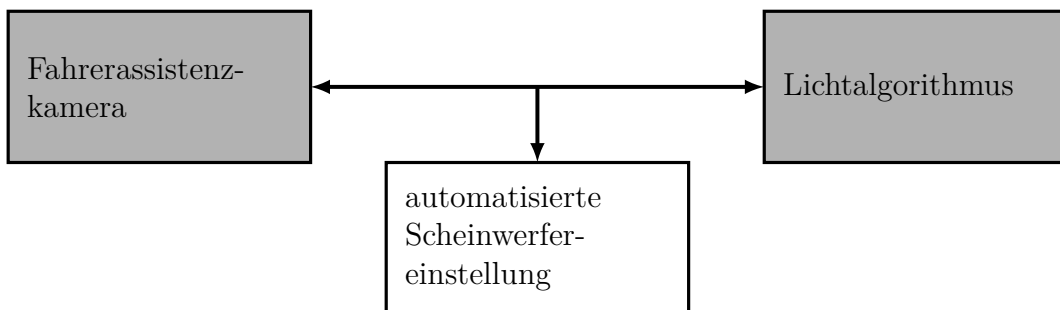


Abbildung 7.2: Systemarchitektur eines kamerabasierten Lichtsystems mit Onlinekalibrierung

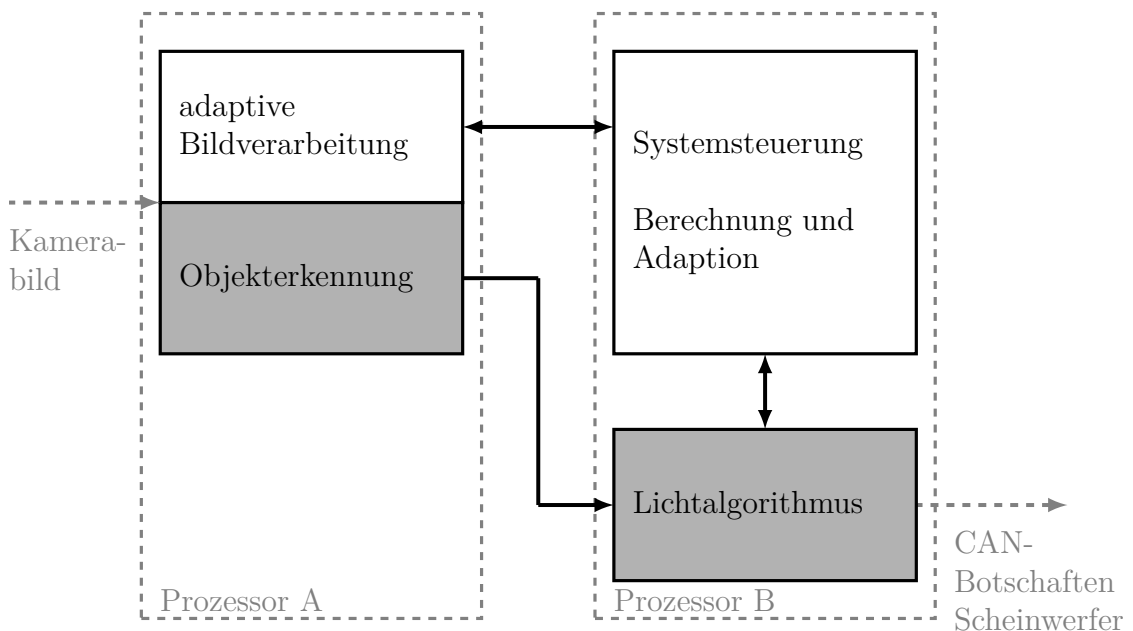


Abbildung 7.3: Verortung der automatisierten Scheinwerfereinstellung in einem hochintegrierten Steuergerät mit Lichtalgorithmus und Objekterkennung

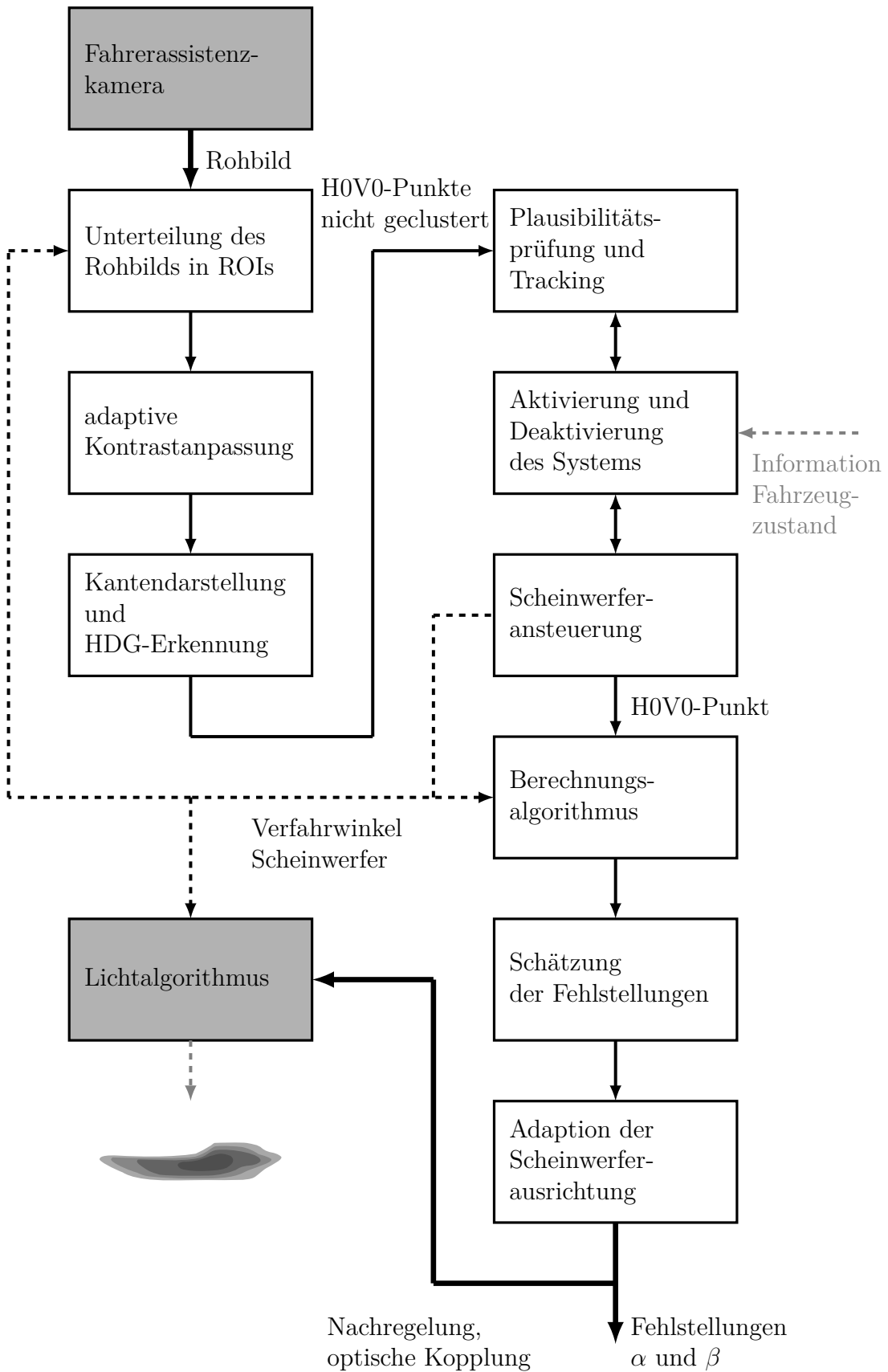


Abbildung 7.4: Darstellung des Systemablaufs

8 Ergebnisse und Ausblick

Im abschließenden Kapitel der Arbeit werden die Ergebnisse präsentiert und ein Ausblick für zukünftige Untersuchungsfelder gegeben.

Ergebnisse: Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass eine automatisierte Scheinwerfereinstellung auf Basis der aktiven Triangulation mit einer Fahrerassistentenkamera und einem Serienscheinwerfer ohne weitere Sensorinformationen sowohl simulativ als auch unter realen Bedingungen möglich ist.

Im Hinblick auf die simulativen Untersuchungen kann herausgestellt werden, dass die bestimmten Standardabweichungen grundsätzlich mit der Anzahl der Einzelergebnisse verringert werden. Der Einfluss des Diskretisierungsfehlers der Kamera kann durch ein gleichverteiltes Rauschen minimiert werden, das durch die Winkel-Offsets bei den Verfahrenswinkeln des Scheinwerfers und durch variable Distanzen zwischen Projektionsfläche und Scheinwerfer realisierbar ist. Auch unter Berücksichtigung angenommener Einflüsse durch die Stellmotorik und die Trackingtoleranz ist eine Gesamtsystemtoleranz von $\pm 0,2\%$ möglich.

Im Kontext der Erkennung der H0V0-Punkte ist nachweisbar, dass die kamera-spezifische Hell-Dunkel-Grenze in der geometrischen Orientierung mit der subjektiv bestimmten und der lichttechnisch gemessenen Hell-Dunkel-Grenze übereinstimmt. Zusätzlich zeigen die herkömmlichen Methoden zur Einstellung des Scheinwerfers mit einer mittleren Standardabweichung von $0,1^\circ$ identische Ergebnisse im Vergleich zur automatisierten Scheinwerfereinstellung. Die Werte sind mit den Angaben aus der Literatur vergleichbar.

Die vorhandenen Abweichungen zwischen Simulation und experimenteller Untersuchung sind hauptsächlich auf die Bildverarbeitung zurückzuführen. Unter der Annahme der experimentell bestimmten Trackingtoleranzen gleicht sich die Standardabweichung der Simulation zunehmend an die realen Bedingungen an. Als größter Beitragsleister der automatisierten Scheinwerfereinstellung wird folglich die Erkennung der H0V0-Punkte identifiziert.

Bezüglich der seriennahen Entwicklung ist die Adaption des Kalibrierverfahrens auf ein in der Serienentwicklung befindliches Matrixsystem hervorzuheben. Ebenso ist eine angepasste automatisierte Scheinwerfereinstellung für den Fahrbetrieb und die Produktionslinie ableitbar, wobei die jeweiligen Einflüsse die Ausführung der Kalibrierung bestimmen.

Das System zeigt eine hohe Flexibilität bezüglich der Anzahl und der Anordnung der charakteristischen Punkte sowie der Wiederholrate des Kalibriervorgangs. Bei

einer hohen Anzahl an charakteristischen Punkten kann die Wiederholrate gering gehalten und die Anordnung der Punkte kann gleichmäßig verteilt werden. Hingegen wird bei einer geringen Anzahl der Punkte eine hohe Wiederholrate gefordert und eine spezifische Anordnung der Punkte mit einer ungleichmäßigen Verteilung befürwortet. Ebenso kann eine verhältnismäßig schlechte Trackingqualität der Bildverarbeitung mittels einer hohen Variabilität der Scheinwerferansteuerung ausgeglichen werden. Der umgekehrte Fall ist mit Bezug auf das Matrixscheinwerfersystem ebenfalls gezeigt.

Ausblick: Der Einzug der blendfreien Fernlichtsysteme in annähernd alle Fahrzeugklassen sowie die Steigerung der Auflösung bei Matrixscheinwerfern wird die Forderung nach präzisen Systemen mit korrekt eingestellten Scheinwerfern erhöhen, da gleichzeitig für eine Akzeptanz dieser kamerabasierten Lichtassistenz eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer mit dem Fernlicht nicht tolerierbar ist.

Entsprechend zeigen die zunehmenden Publikationen zum Themengebiet der automatisierten Scheinwerfereinstellung und das bundesgeförderte Projekt zu selbststellenden Scheinwerfern, dass zukünftig die Chancen für eine automatisierte Scheinwerfereinstellung auf Basis der Fahrerassistentenkamera im Serieneinsatz gegeben sind.

Für das Kalibrierverfahren mittels aktiver Triangulation bedeutet dies, die Trackingtoleranz sukzessive zu verringern sowie die geometrischen Veränderungen der HDG noch besser zu erkennen und zu korrigieren. In diesem Zusammenhang liefert das vorgestellte *LVQ-Verfahren* bereits gute Ergebnisse. Eine fundierte Untersuchung steht allerdings noch aus. Die Erfassung der Ausprägung des Farbsaums an der HDG der Lichtverteilung könnte ebenfalls ein Anwendungsgebiet des vorgestellten Klassifizierungsverfahrens sein, was im Kontext der Qualität der Lichtverteilung als Gütekriterium für die Scheinwerfer angesehen werden kann.

In Anlehnung an die experimentellen Untersuchungen ist eine Verkehrsraumanalyse offen, die die tatsächlichen Wiederholraten der automatisierten Scheinwerfereinstellung im Fahrbetrieb darstellt. Im Hinblick auf die mathematischen Ersatzmodelle sind fundierte Betrachtungen auf der Basis größerer Messreihen ausstehend.

Im Kontext einer möglichst unauffälligen Kalibrierung für den Fahrer ist zukünftig eine prototypische Umsetzung der passiven Variante des aktiven Triangulationsverfahrens interessant, wobei das Augenmerk zunehmend auf die Synchronisierung zwischen Scheinwerfer und Kamera gelegt werden muss.

A Berechnungsalgorithmus

A.1 Berechnungsverfahren mit explizitem Lösungsweg

A.1.1 Lösungsweg für Modellansatz 1

Das zu lösende Gleichungssystem ist Gleichung (4.26) in Abschnitt 4.3.2 zu entnehmen.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} s_{0,1,x} \\ s_{0,1,y} \\ s_{0,1,z} \end{pmatrix}}_{\vec{s}_{0,1}} + s \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} p'_{SW,x}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) \\ p'_{SW,y}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) \\ p'_{SW,z}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) \end{pmatrix}}_{\vec{p}'_{SW}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p)} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_{0,x} \\ r_{0,y} \\ r_{0,z} \end{pmatrix}}_{\vec{r}_0} + r \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} k_{np,mp,x} \\ k_{np,mp,y} \\ k_{np,mp,z} \end{pmatrix}}_{\vec{k}_{np,mp}}$$

H0V0 -Vektor global
Detektionsbereich global

Der Modellansatz 1 sieht eine Trennung zwischen den Drehmatrizen der Verfahrenswinkel und den Drehmatrizen der Fehlstellungen vor, siehe Abbildung A.1. Nachfolgend wird die Lösung für den Ansatz nach Gleichung (5.13), Abschnitt 5.3.1, dargestellt.

aus

$$s_1 \cdot D_{y,SW}(\theta_1) D_{z,SW}(\phi_1) D_{y,SW}(\beta) D_{z,SW}(\alpha) \vec{p}_{0,SW} - r_1 \cdot \vec{k}_{n_1,m_1} = \vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1}$$

$$s_2 \cdot D_{y,SW}(\theta_2) D_{z,SW}(\phi_2) D_{y,SW}(\beta) D_{z,SW}(\alpha) \vec{p}_{0,SW} - r_2 \cdot \vec{k}_{n_2,m_2} = \vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1}$$

mit

$$s_1 \cdot \underbrace{D_{y,SW}(\beta) D_{z,SW}(\alpha)}_{\vec{l}_{n_1,m_1}} \cdot \underbrace{\vec{p}_{0,SW}}_{\vec{q}_{0,1,1}} - \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) & -\sin(\alpha) \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ -\sin(\beta) \cos(\alpha) & \sin(\beta) \sin(\alpha) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$r_1 \cdot \underbrace{D_{z,SW}(\phi_1)^T D_{y,SW}(\theta_1)^T \vec{k}_{n_1,m_1}}_{\vec{l}_{n_1,m_1}} = \underbrace{D_{z,SW}(\phi_1)^T D_{y,SW}(\theta_1)^T (\vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1})}_{\vec{q}_{0,1,1}}$$

$$s_2 \cdot \underbrace{D_{y,SW}(\beta) D_{z,SW}(\alpha)}_{\vec{l}_{n_2,m_2}} \cdot \underbrace{\vec{p}_{0,SW}}_{\vec{q}_{0,1,2}} - \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) & -\sin(\alpha) \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ -\sin(\beta) \cos(\alpha) & \sin(\beta) \sin(\alpha) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$r_2 \cdot \underbrace{D_{z,SW}(\phi_2)^T D_{y,SW}(\theta_2)^T \vec{k}_{n_2,m_2}}_{\vec{l}_{n_2,m_2}} = \underbrace{D_{z,SW}(\phi_2)^T D_{y,SW}(\theta_2)^T (\vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1})}_{\vec{q}_{0,1,2}}$$

folgt

$$q_{0,1,x,1} = s_1 \cdot \cos(\alpha) \cos(\beta) - r_1 \cdot l_{n_1,m_1,x} \quad (\text{A.1})$$

$$q_{0,1,y,1} = s_1 \cdot \sin(\alpha) - r_1 \cdot l_{n_1,m_1,y} \quad (\text{A.2})$$

$$q_{0,1,z,1} = s_1 \cdot (-1) \cdot \sin(\beta) \cos(\alpha) - r_1 \cdot l_{n_1,m_1,z} \quad (\text{A.3})$$

1. Scheinwerferverlagerung

$$q_{0,1,x,2} = s_2 \cdot \cos(\alpha) \cos(\beta) - r_2 \cdot l_{n_2,m_2,x} \quad (\text{A.4})$$

$$q_{0,1,y,2} = s_2 \cdot \sin(\alpha) - r_2 \cdot l_{n_2,m_2,y} \quad (\text{A.5})$$

$$q_{0,1,z,2} = s_2 \cdot (-1) \cdot \sin(\beta) \cos(\alpha) - r_2 \cdot l_{n_2,m_2,z} \quad (\text{A.6})$$

2. Scheinwerferverlagerung

Durch das Gleichsetzen von Gleichung (A.1) mit Gleichung (A.4) und Gleichung (A.2) mit Gleichung (A.5) sowie von Gleichung (A.3) mit Gleichung (A.6) des Gleichungssystems können die von α und β abhängigen Terme eliminiert werden, Gleichungen (A.7), (A.8) und (A.9). Es entstehen drei Ausdrücke für $\frac{s_1}{s_2}$, wobei mittels der Gleichungen (A.7) und (A.9) sowie den Gleichungen (A.7) und (A.8) zwei Ausdrücke mit den unbekanntem Entfernungsinformationen r_1 und r_2 gebildet werden, Gleichungen (A.10) und (A.11). Die Entfernungsinformation ist durch die Lösung einer quadratischen Gleichung (A.12) bestimmbar.

Unabhängigkeit von α und β

$$\frac{q_{0,1,x,1} + r_1 \cdot l_{n_1,m_1,x}}{q_{0,1,x,2} + r_2 \cdot l_{n_2,m_2,x}} = \frac{s_1}{s_2} \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{q_{0,1,y,1} + r_1 \cdot l_{n_1,m_1,y}}{q_{0,1,y,2} + r_2 \cdot l_{n_2,m_2,y}} = \frac{s_1}{s_2} \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{q_{0,1,z,1} + r_1 \cdot l_{n_1,m_1,z}}{q_{0,1,z,2} + r_2 \cdot l_{n_2,m_2,z}} = \frac{s_1}{s_2} \quad (\text{A.9})$$

$$r_1 = \frac{-a_1 - r_2 a_3}{a_2 + r_2 a_4} \quad (\text{A.10})$$

mit

$$\begin{aligned} a_1 &= q_{0,1,z,1} q_{0,1,x,2} - q_{0,1,x,1} q_{0,1,z,2} \\ a_2 &= l_{n_1,m_1,z} q_{0,1,x,2} - l_{n_1,m_1,x} q_{0,1,z,2} \\ a_3 &= l_{n_2,m_2,x} q_{0,1,z,1} - l_{n_2,m_2,z} q_{0,1,x,1} \\ a_4 &= l_{n_1,m_1,z} l_{n_2,m_2,x} - l_{n_2,m_2,z} l_{n_1,m_1,x} \end{aligned}$$

$$r_1 = \frac{-b_1 - r_2 b_3}{b_2 + r_2 b_4} \quad (\text{A.11})$$

mit

$$\begin{aligned} b_1 &= q_{0,1,y,1} q_{0,1,x,2} - q_{0,1,x,1} q_{0,1,y,2} \\ b_2 &= l_{n_1,m_1,y} q_{0,1,x,2} - l_{n_1,m_1,x} q_{0,1,y,2} \\ b_3 &= l_{n_2,m_2,x} q_{0,1,y,1} - l_{n_2,m_2,y} q_{0,1,x,1} \\ b_4 &= l_{n_1,m_1,y} l_{n_2,m_2,x} - l_{n_2,m_2,y} l_{n_1,m_1,x} \end{aligned}$$

quadratischer Ausdruck durch Gleichsetzen von (A.10) und (A.11)

$$r_2^2 c_3 + r_2 c_2 + c_1 = 0$$

$$r_{2,1,2} = \frac{-c_2}{2c_3} \pm \sqrt{\frac{c_2^2}{4c_3^2} - \frac{c_1}{c_3}} \quad (\text{A.12})$$

mit

$$\begin{aligned} c_1 &= b_1 a_2 - a_1 b_2 \\ c_2 &= b_3 a_2 + b_1 a_4 - b_2 a_3 - a_1 b_4 \\ c_3 &= b_3 a_4 - a_3 b_4 \end{aligned}$$

Auflösen nach α und β

$$\arctan\left(-\frac{q_{0,1,z,2} + r_{2,1,2} \cdot l_{n_2,m_2,z}}{q_{0,1,x,2} + r_{2,1,2} \cdot l_{n_2,m_2,x}}\right) = \beta_{1,2} \quad (\text{A.13})$$

$$\arctan\left(\frac{q_{0,1,y,2} + r_{2,1,2} \cdot l_{n_2,m_2,y}}{q_{0,1,x,2} + r_{2,1,2} \cdot l_{n_2,m_2,x}} \cdot \cos(\beta_{1,2})\right) = \alpha_{1,2} \quad (\text{A.14})$$

Aus den Gleichungen (A.4) und (A.6) kann die Gleichung (A.13) bestimmt werden, wodurch sich $\beta_{1,2}$ ergibt. Über die Gleichungen (A.4) und (A.5) ist Gleichung (A.14) ableitbar, aus der $\alpha_{1,2}$ mittels $\beta_{1,2}$ berechnet werden kann.

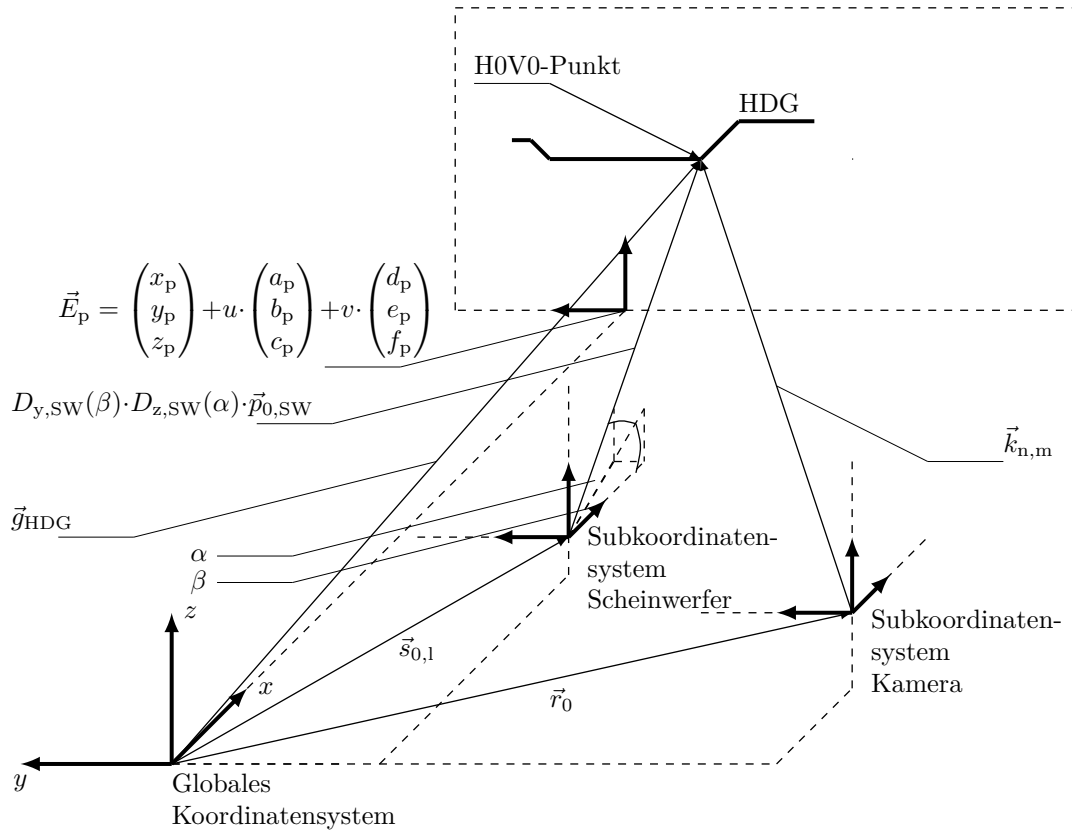


Abbildung A.1: Idealisierte geometrische Beziehungen zwischen dem linken Hauptscheinwerfer, der Fahrerassistenzkamera und dem globalen Koordinatensystem

A.1.2 Lösungsweg für Modellansatz 2

Das zu lösende Gleichungssystem ist Gleichung (4.26) in Abschnitt 4.3.2 zu entnehmen.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} s_{0,1,x} \\ s_{0,1,y} \\ s_{0,1,z} \end{pmatrix}}_{\vec{s}_{0,1}} + s \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} p'_{SW,x}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) \\ p'_{SW,y}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) \\ p'_{SW,z}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p) \end{pmatrix}}_{\vec{p}'_{SW}(\alpha, \beta, \phi_p, \theta_p)} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_{0,x} \\ r_{0,y} \\ r_{0,z} \end{pmatrix}}_{\vec{r}_0} + r \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} k_{np,mp,x} \\ k_{np,mp,y} \\ k_{np,mp,z} \end{pmatrix}}_{\vec{k}_{np,mp}}$$

H0V0 -Vektor global *Detektionsbereich global*

Im Modellansatz 2 werden die vertikalen und die horizontalen Fehlstellungen als Winkel-Offsets der vertikalen und der horizontalen Verfahrenswinkel betrachtet, siehe

Abbildung A.2. Nachfolgend wird die Lösung für den Ansatz nach Gleichung (5.15), Abschnitt 5.3.1, dargestellt.

aus

$$s_1 \cdot D_{y,SW}(\beta + \theta_1) D_{z,SW}(\alpha + \phi_1) \vec{p}_{0,SW} - r_1 \cdot \vec{k}_{n_1, m_1} = \vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1}$$

$$s_2 \cdot D_{y,SW}(\beta + \theta_2) D_{z,SW}(\alpha + \phi_2) \vec{p}_{0,SW} - r_2 \cdot \vec{k}_{n_2, m_2} = \vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1}$$

mit

$$s_1 \cdot \underbrace{D_{y,SW}(\beta) D_{z,SW}(\alpha + \phi_1)} \cdot \vec{p}_{0,SW} - \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \phi_1) \cos(\beta) & -\sin(\alpha + \phi_1) \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha + \phi_1) & \cos(\alpha + \phi_1) & 0 \\ -\sin(\beta) \cos(\alpha + \phi_1) & \sin(\beta) \sin(\alpha + \phi_1) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$r_1 \cdot \underbrace{D_{y,SW}(\theta_1)^T \vec{k}_{n_1, m_1}}_{\vec{l}_{n_1, m_1}} = \underbrace{D_{y,SW}(\theta_1)^T (\vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1})}_{\vec{q}_{0,1,1}}$$

$$s_2 \cdot \underbrace{D_{y,SW}(\beta) D_{z,SW}(\alpha + \phi_2)} \cdot \vec{p}_{0,SW} - \begin{pmatrix} \cos(\alpha + \phi_2) \cos(\beta) & -\sin(\alpha + \phi_2) \cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha + \phi_2) & \cos(\alpha + \phi_2) & 0 \\ -\sin(\beta) \cos(\alpha + \phi_2) & \sin(\beta) \sin(\alpha + \phi_2) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$r_2 \cdot \underbrace{D_{y,SW}(\theta_2)^T \vec{k}_{n_2, m_2}}_{\vec{l}_{n_2, m_2}} = \underbrace{D_{y,SW}(\theta_2)^T (\vec{r}_0 - \vec{s}_{0,1})}_{\vec{q}_{0,1,2}}$$

folgt

$$q_{0,1,x,1} = s_1 \cdot \cos(\alpha + \phi_1) \cos(\beta) - r_1 \cdot l_{n_1, m_1, x} \quad (\text{A.15})$$

$$q_{0,1,y,1} = s_1 \cdot \sin(\alpha + \phi_1) - r_1 \cdot l_{n_1, m_1, y} \quad (\text{A.16})$$

$$q_{0,1,z,1} = s_1 \cdot (-1) \cdot \sin(\beta) \cos(\alpha + \phi_1) - r_1 \cdot l_{n_1, m_1, z} \quad (\text{A.17})$$

1. Scheinwerferverlagerung

$$q_{0,1,x,2} = s_2 \cdot \cos(\alpha + \phi_2) \cos(\beta) - r_2 \cdot l_{n_2, m_2, x} \quad (\text{A.18})$$

$$q_{0,1,y,2} = s_2 \cdot \sin(\alpha + \phi_2) - r_2 \cdot l_{n_2, m_2, y} \quad (\text{A.19})$$

$$q_{0,1,z,2} = s_2 \cdot (-1) \cdot \sin(\beta) \cos(\alpha + \phi_2) - r_2 \cdot l_{n_2, m_2, z} \quad (\text{A.20})$$

2. Scheinwerferverlagerung

Durch die Anwendung der Additionstheoreme werden die Winkel für die Fehlstellungen und für die Verfahrspositionen getrennt. Für die nachfolgende Auflösung werden die Ausdrücke durch einen ersten Substitutionsschritt (Substitution I) vereinfacht. Die Gleichungen (A.15) und (A.18) werden nach r_1 und r_2 aufgelöst. Durch das Einsetzen von r_1 in die Gleichungen (A.16) und (A.17) sowie von r_2 in die Gleichungen (A.19) und (A.20) entstehen zwei Ausdrücke für s_1 , Gleichungen (A.21) und (A.22), sowie für s_2 , Gleichungen (A.23) und (A.24).

Anwendung der Additionstheoreme und Substitution I

$$\cos(\alpha + \phi_1) = \underbrace{\cos(\phi_1) \cos(\alpha) - \sin(\phi_1) \sin(\alpha)}_a$$

$$\sin(\alpha + \phi_1) = \underbrace{\sin(\phi_1) \cos(\alpha) + \cos(\phi_1) \sin(\alpha)}_b$$

$$\cos(\alpha + \phi_2) = \underbrace{\cos(\phi_2) \cos(\alpha) - \sin(\phi_2) \sin(\alpha)}_c$$

$$\sin(\alpha + \phi_2) = \underbrace{\sin(\phi_2) \cos(\alpha) + \cos(\phi_2) \sin(\alpha)}_d$$

Gleichung (A.15) auflösen nach r_1 , Gleichung (A.18) auflösen nach r_2

$$r_1 = \frac{s_1 \cdot \cos(\beta) \cdot a - q_{0,l,x,1}}{l_{n_1,m_1,x}}$$

$$r_2 = \frac{s_2 \cdot \cos(\beta) \cdot c - q_{0,l,x,2}}{l_{n_2,m_2,x}}$$

r_1 in Gleichung (A.16) und (A.17), sowie r_2 in Gleichung (A.19) und (A.20)

Auflösen nach s_1 und s_2

$$s_1 = \frac{q_{0,l,y,1} \cdot l_{n_1,m_1,x} - q_{0,l,x,1} \cdot l_{n_1,m_1,y}}{b \cdot l_{n_1,m_1,x} - \cos(\beta) \cdot a \cdot l_{n_1,m_1,y}} \quad (\text{A.21})$$

$$s_1 = \frac{-q_{0,l,z,1} \cdot l_{n_1,m_1,x} + q_{0,l,x,1} \cdot l_{n_1,m_1,z}}{a \cdot l_{n_1,m_1,x} \cdot \sin(\beta) + \cos(\beta) \cdot a \cdot l_{n_1,m_1,z}} \quad (\text{A.22})$$

$$s_2 = \frac{q_{0,l,y,2} \cdot l_{n_2,m_2,x} - q_{0,l,x,2} \cdot l_{n_1,m_2,y}}{d \cdot l_{n_2,m_2,x} - \cos(\beta) \cdot c \cdot l_{n_2,m_2,y}} \quad (\text{A.23})$$

$$s_2 = \frac{-q_{0,l,z,2} \cdot l_{n_2,m_2,x} + q_{0,l,x,2} \cdot l_{n_1,m_2,z}}{c \cdot l_{n_2,m_2,x} \cdot \sin(\beta) + \cos(\beta) \cdot c \cdot l_{n_2,m_2,z}} \quad (\text{A.24})$$

Durch das Gleichsetzen der Gleichungen (A.21) und (A.22) sowie der Gleichungen (A.23) und (A.24) in Kombination mit der Resubstitution der substituierten Winkelbeziehungen ergeben sich die Gleichungen (A.25) und (A.26). Berücksichtigt werden müssen zwei weitere Substitutionsschritte (Substitution II und Substitution III), die keine horizontalen und vertikalen Fehlstellungen mehr enthalten.

Gleichsetzen der Gleichungen (A.21) und (A.22), Resubstitution I
mit Substitution II

$$Q_1 = q_{0,l,y,1} \cdot l_{n_1,m_1,x} - q_{0,l,x,1} \cdot l_{n_1,m_1,y}$$

$$P_1 = q_{0,l,x,1} \cdot l_{n_1,m_1,z} - q_{0,l,z,1} \cdot l_{n_1,m_1,x}$$

mit Substitution III

$$A_1 = \cos(\phi_1) \cdot Q_1 \cdot l_{n_1,m_1,x}$$

$$B_1 = \cos(\phi_1) \cdot (Q_1 \cdot l_{n_1,m_1,z} + P_1 \cdot l_{n_1,m_1,y})$$

$$C_1 = -\sin(\phi_1) \cdot Q_1 \cdot l_{n_1,m_1,x}$$

$$D_1 = -\sin(\phi_1) \cdot (Q_1 \cdot l_{n_1,m_1,z} + P_1 \cdot l_{n_1,m_1,y})$$

$$E_1 = -\sin(\phi_1) \cdot P_1 \cdot l_{n_1,m_1,x}$$

$$F_1 = -\cos(\phi_1) \cdot P_1 \cdot l_{n_1,m_1,x}$$

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) \left(\cos(\beta) B_1 + \sin(\beta) A_1 + E_1 \right) &= \sin(\alpha) \left(\cos(\beta) (-D_1) + \sin(\beta) (-C_1) + (-F_1) \right) \\ \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} &= \frac{\cos(\beta) B_1 + \sin(\beta) A_1 + E_1}{\cos(\beta) (-D_1) + \sin(\beta) (-C_1) + (-F_1)} \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

Gleichsetzen der Gleichungen (A.23) und (A.24), Resubstitution I
mit Substitution II

$$Q_2 = q_{0,l,y,2} \cdot l_{n_2,m_2,x} - q_{0,l,x,2} \cdot l_{n_2,m_2,y}$$

$$P_2 = q_{0,l,x,2} \cdot l_{n_2,m_2,z} - q_{0,l,z,2} \cdot l_{n_2,m_2,x}$$

mit Substitution III

$$A_2 = \cos(\phi_2) \cdot Q_2 \cdot l_{n_2,m_2,x}$$

$$B_2 = \cos(\phi_2) \cdot (Q_2 \cdot l_{n_2,m_2,z} + P_2 \cdot l_{n_2,m_2,y})$$

$$C_2 = -\sin(\phi_2) \cdot Q_2 \cdot l_{n_2,m_2,x}$$

$$D_2 = -\sin(\phi_2) \cdot (Q_2 \cdot l_{n_2,m_2,z} + P_2 \cdot l_{n_2,m_2,y})$$

$$E_2 = -\sin(\phi_2) \cdot P_2 \cdot l_{n_2,m_2,x}$$

$$F_2 = -\cos(\phi_2) \cdot P_2 \cdot l_{n_2,m_2,x}$$

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) \left(\cos(\beta) B_2 + \sin(\beta) A_2 + E_2 \right) &= \sin(\alpha) \left(\cos(\beta) (-D_2) + \sin(\beta) (-C_2) + (-F_2) \right) \\ \frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} &= \frac{\cos(\beta) B_2 + \sin(\beta) A_2 + E_2}{\cos(\beta) (-D_2) + \sin(\beta) (-C_2) + (-F_2)} \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

Die Gleichungen (A.25) und (A.26) werden in einem nächsten Schritt gleichgesetzt, wodurch ein Ausdruck entsteht der nur abhängig von β ist. Durch einen vierten und einen fünften Substitutionsschritt (Substitution IV und Substitution V) sowie durch die Anwendung eines weiteren Additionstheorems ist eine resultierende Gleichung (A.27) 4. Grades ableitbar.

Gleichsetzen der Gleichungen (A.25) und (A.26)

$$\frac{\cos(\beta)B_1 + \sin(\beta)A_1 + E_1}{\cos(\beta)D_1 + \sin(\beta)C_1 + F_1} = \frac{\cos(\beta)B_2 + \sin(\beta)A_2 + E_2}{\cos(\beta)D_2 + \sin(\beta)C_2 + F_2}$$

Substitution IV

$$A = B_1D_2 - B_2D_1$$

$$B = A_1D_2 + B_1C_2 - A_2D_1 - B_2C_1$$

$$C = B_1F_2 + E_1D_2 - B_2F_1 - E_2D_1$$

$$D = A_1C_2 - A_2C_1$$

$$E = A_1F_2 + E_1C_2 - A_2F_1 - E_2C_1$$

$$F = E_2F_1 - E_1F_2$$

$$A \cos(\beta)^2 + B \sin(\beta) \cos(\beta) + C \cos(\beta) + D \sin(\beta)^2 + E \sin(\beta) - F = 0$$

Anwendung des Additionstheorems $\sin(\beta) = \sqrt{1 - \cos(\beta)^2}$

mit Substitution V

$$a_1 = \frac{2C(A - D) + 2BE}{(D - A)^2 + B^2}$$

$$a_2 = \frac{2C(D - A)(F - D) + C^2 + E^2 - B^2}{(D - A)^2 + B^2}$$

$$a_3 = \frac{2C(D - F) - 2BE}{(D - A)^2 + B^2}$$

$$a_4 = \frac{(F - D)^2 - E^2}{(D - A)^2 + B^2}$$

$$x = \cos(\beta)$$

Resultierende Gleichung 4. Grades

$$x^4 + a_1x^4 + a_2x^3 + a_3x + a_4 = 0 \tag{A.27}$$

Die Gleichung (A.27) ist auf die allgemeine Gleichung 4. Grades gebracht und über die Substitution mit $y = x + \frac{a_1}{4}$ in die Normalform überführbar. Die Lösbarkeit der Normalform ist von der kubischen Resolventen abhängig, siehe hierzu [135]. Es sind vier Lösungen zu erwarten, wobei die realen Lösungen für die Bestimmung der vertikalen Fehlstellung von Bedeutung sind. Den realen Lösungen folgen Resubstitutionen zur Bestimmung von β . Final wird die horizontale Fehlstellung durch die Gleichung (A.25) bzw. (A.26) bestimmt.

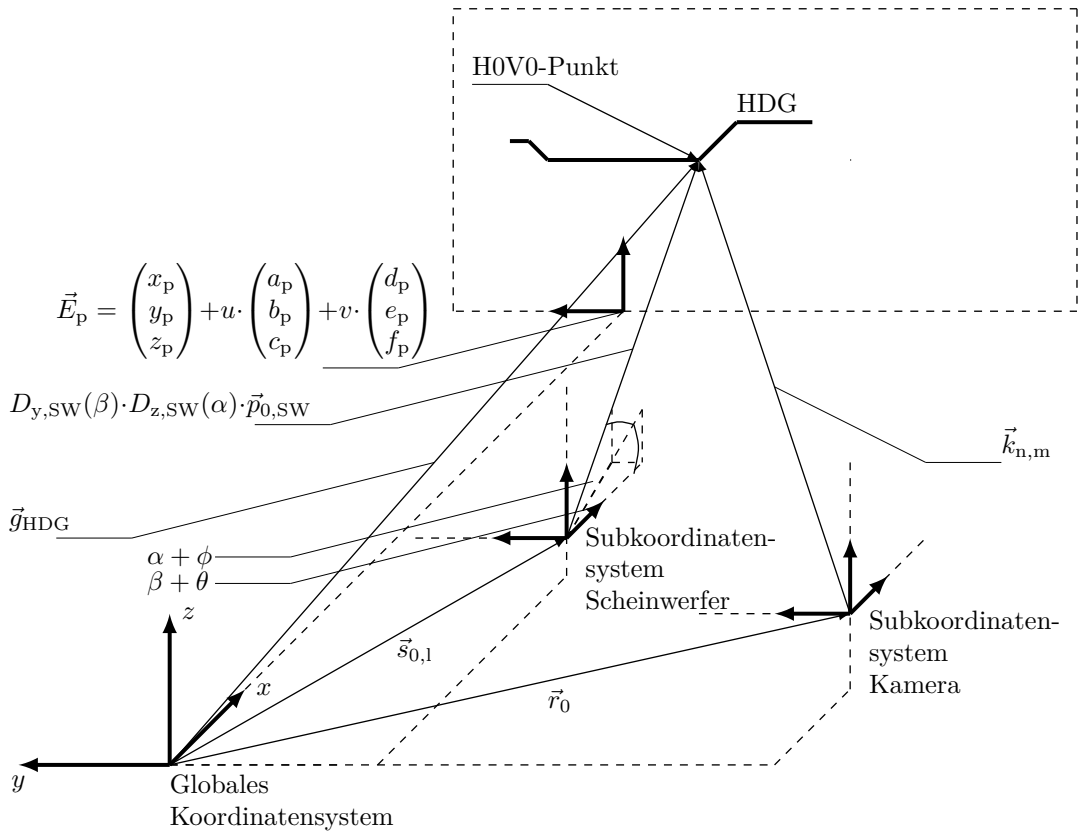


Abbildung A.2: Idealisierte geometrische Beziehungen zwischen dem linken Hauptscheinwerfer, der Fahrerassistenzkamera und dem globalen Koordinatensystem

A.2 Newton-Verfahren für Modellansatz 3

A.2.1 Newton-Verfahren

Das *Newton-Verfahren* wird verwendet um über ein Nullstellenproblem, Gleichung (A.28), eine Näherungslösung zu bestimmen.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{pmatrix}}_{\vec{f}(\vec{x})} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}}_{\vec{0}} \quad (\text{A.28})$$

Unter der Annahme n nichtlinearer Gleichungen mit n Unbekannten (x_1, x_1, \dots, x_n) wird das System iterativ auf Basis eines Startvektors \vec{x}_0 gelöst.

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - \left(J_{\vec{f}}(\vec{x}_k) \right)^{-1} \cdot \vec{f}(\vec{x}_k) \quad (\text{A.29})$$

Die Jacobi-Matrix $J_{\vec{f}}(\vec{x}_k)$ des Systems $\vec{f}(\vec{x})$ ist Gleichung (A.30) zu entnehmen.

$$J_{\vec{f}}(\vec{x}_k) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (\text{A.30})$$

Für einen hinreichend genauen Startvektor \vec{x}_0 konvergiert das *Newton-Verfahren* quadratisch [24]. Die Bildung der inversen Jacobi-Matrix kann umgangen werden, indem ein lineares Gleichungssystem, Gleichung (A.31), gebildet wird.

$$J_{\vec{f}}(\vec{x}_k) \cdot \Delta \vec{x}_{k,k+1} = \vec{f}(\vec{x}_k) \quad (\text{A.31})$$

Aus dem Lösungsvektor des Gleichungssystems $\Delta \vec{x}_{k,k+1}$ ist mittels Gleichung (A.32) der nächste Rekursionsschritt \vec{x}_{k+1} bestimmbar.

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k - \Delta \vec{x}_{k,k+1} \quad (\text{A.32})$$

A.2.2 Anwendung des Newton-Verfahrens

Für die Anwendung des *Newton-Verfahrens* bei der automatisierte Scheinwerfereinstellung werden sechs nichtlineare Gleichungen mit sechs Unbekannten (α , β , s_1 , s_2 , r_1 , r_2) verwendet. Ein funktionaler Zusammenhang $\vec{\mathcal{F}}$ wird gebildet. Die Jacobi-Matrix ergibt sich zu:

$$J_{\vec{\mathcal{F}}}(\vec{x}_k) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial \beta} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial s_1} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial s_2} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial r_1} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial r_2} \\ \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_2}{\partial \alpha} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_2}{\partial \beta} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_2}{\partial s_1} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_2}{\partial s_2} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_2}{\partial r_1} & \frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_2}{\partial r_2} \end{pmatrix} \quad (\text{A.33})$$

Die einzelnen Ableitungen sind für den Ansatz $D_{y,\beta} D_{z,\alpha} D_{y,\theta} D_{z,\phi}$ und den funktionalen Zusammenhang eines charakteristischen Punkts $\vec{\mathcal{F}}_1$ dargestellt:

$$\frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial \alpha} = s_1 \cdot \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\sin(\alpha) & -\cos \alpha & 0 \\ \cos(\alpha) & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) \cos(\phi_1) & -\cos(\theta_1) \sin(\phi_1) & \sin(\theta_1) \\ \sin(\phi_1) & \cos(\phi_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) \cos(\phi_1) & \sin(\theta_1) \sin(\phi_1) & \cos(\theta_1) \end{pmatrix} \quad (\text{A.34})$$

$$\frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial \beta} = s_1 \cdot \begin{pmatrix} -\sin(\beta) & 0 & \cos \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ -\cos(\beta) & 0 & -\sin \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin \alpha & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) \cos(\phi_1) & -\cos(\theta_1) \sin(\phi_1) & \sin(\theta_1) \\ \sin(\phi_1) & \cos(\phi_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) \cos(\phi_1) & \sin(\theta_1) \sin(\phi_1) & \cos(\theta_1) \end{pmatrix} \quad (\text{A.35})$$

$$\frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial s_1} = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin \alpha & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) \cos(\phi_1) & -\cos(\theta_1) \sin(\phi_1) & \sin(\theta_1) \\ \sin(\phi_1) & \cos(\phi_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) \cos(\phi_1) & \sin(\theta_1) \sin(\phi_1) & \cos(\theta_1) \end{pmatrix} \quad (\text{A.36})$$

$$\frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial s_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.37})$$

$$\frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial r_1} = \begin{pmatrix} k_{n,m,x} \\ k_{n,m,y} \\ k_{n,m,z} \end{pmatrix} \quad (\text{A.38})$$

$$\frac{\partial \vec{\mathcal{F}}_1}{\partial r_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.39})$$

Für den notwendigen zweiten charakteristischen Punkt ergeben sich die Ableitungen für $\vec{\mathcal{F}}_2$ entsprechend den Gleichungen (A.34), (A.35), (A.36), (A.37), (A.38) und (A.39).

B Versuchsdurchführungen und Messergebnisse

B.1 Versuchsdurchführungen

Im Zuge der Anwendung des Kalibrierverfahrens werden für die Durchführung der Versuche feste Verfahrspositionen des Scheinwerfers vorgehalten, Abschnitt B.1.1. Die Probandenstudie und die indirekten Leuchtdichtemessungen werden unter statischen Bedingungen im Labor ausgeführt, Abschnitt B.1.2.

B.1.1 Winkelverteilungen der charakteristischen Positionen

Die Verfahrswinkel der Scheinwerfer definieren die charakteristischen Positionen, die für das Kalibrierverfahren genutzt werden. Grundsätzlich werden 25 Positionen mit den entsprechenden horizontalen ϕ und vertikalen Winkel θ vorgehalten, siehe hierfür Tabelle B.1.

Die Aufteilung der charakteristischen Punkte ist in Abbildung B.1 schematisch gezeigt. Die Anordnung ist aus der Sicht auf die Projektionsfläche zu verstehen. Es wird der maximale ALWR-Bereich mit $\pm 3^\circ$ ausgenutzt. Die maximalen horizontalen Verfahrswinkel werden auf $\pm 4^\circ$ begrenzt, wodurch keine zusätzliche Anpassung der ROI notwendig wird.

Tabelle B.1: Verfahrwinkel der charakteristischen Positionen des Scheinwerfers

Verfahrwinkel [°]	Charakteristische Positionen des Scheinwerfers				
	1	2	3	4	5
ϕ	0,0°	2,0°	0,0°	-2,0°	2,0°
θ	0,0°	1,5°	1,5°	1,5°	0,0°
	6	7	8	9	10
ϕ	-2,0°	2,0°	0,0°	-2,0°	4,0°
θ	0,0°	-1,5°	-1,5°	-1,5°	0,0°
	11	12	13	14	15
ϕ	-4,0°	4,0°	-4,0°	4,0°	-4,0°
θ	0,0°	1,5°	1,5°	-1,5°	-1,5°
	16	17	18	19	20
ϕ	2,0°	0,0°	-2,0°	4,0°	-4,0°
θ	3,0°	3,0°	3,0°	3,0°	3,0°
	21	22	23	24	25
ϕ	2,0°	0,0°	-2,0°	4,0°	-4,0°
θ	-3,0°	-3,0°	-3,0°	-3,0°	-3,0°

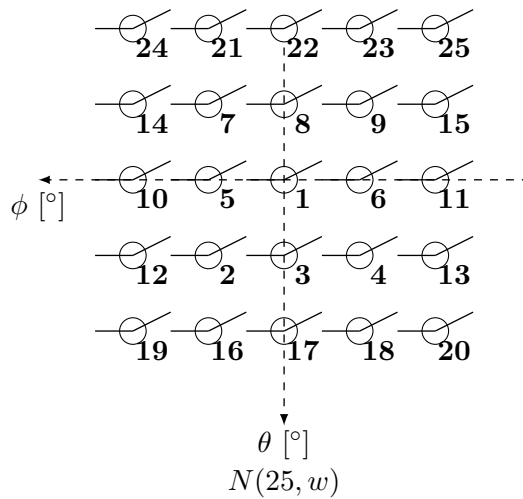


Abbildung B.1: Schematische Darstellung der Verfahrpositionen des Scheinwerfers mit Blick auf die Projektionsfläche

Für die Ausführung des Kalibrierverfahrens sind mindestens zwei unterschiedliche charakteristische Punkte notwendig. In Tabelle B.2 sind alle Punktkombinationen, die eine Kalibrierung auf der Basis der ersten 11 Positionen, Tabelle B.1, ermöglichen, aufgelistet.

Tabelle B.2: Zuordnung von jeweils zwei charakteristischen Positionen zu einer Kombinationsnummer

Charakteristische Positionen	Kombinationsnummer											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Position	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
2. Position	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	3	4
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1. Position	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
2. Position	5	6	7	8	9	10	11	4	5	6	7	8
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1. Position	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5
2. Position	9	10	11	5	6	7	8	9	10	11	6	7
	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
1. Position	5	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7
2. Position	8	9	10	11	7	8	9	10	11	8	9	10
	49	50	51	52	53	54	55					
1. Position	7	8	8	8	9	9	10					
2. Position	11	9	10	11	10	11	11					

B.1.2 Probandenstudie und indirekte Leuchtdichtemessung

Zur Durchführung der Probandenstudie und der indirekten Leuchtdichtemessung wird der gleiche Aufbau verwendet. Das Fahrzeug wird so ausgerichtet, dass die Fahrzeuglängsachse senkrecht zur Projektionsfläche orientiert ist. Hierfür werden die Abstände zwischen der linken und der rechten Hinterachse zu der Projektionsfläche gemessen. Von einem hinreichend ebenen Boden wird unter Laborbedingungen ausgegangen.

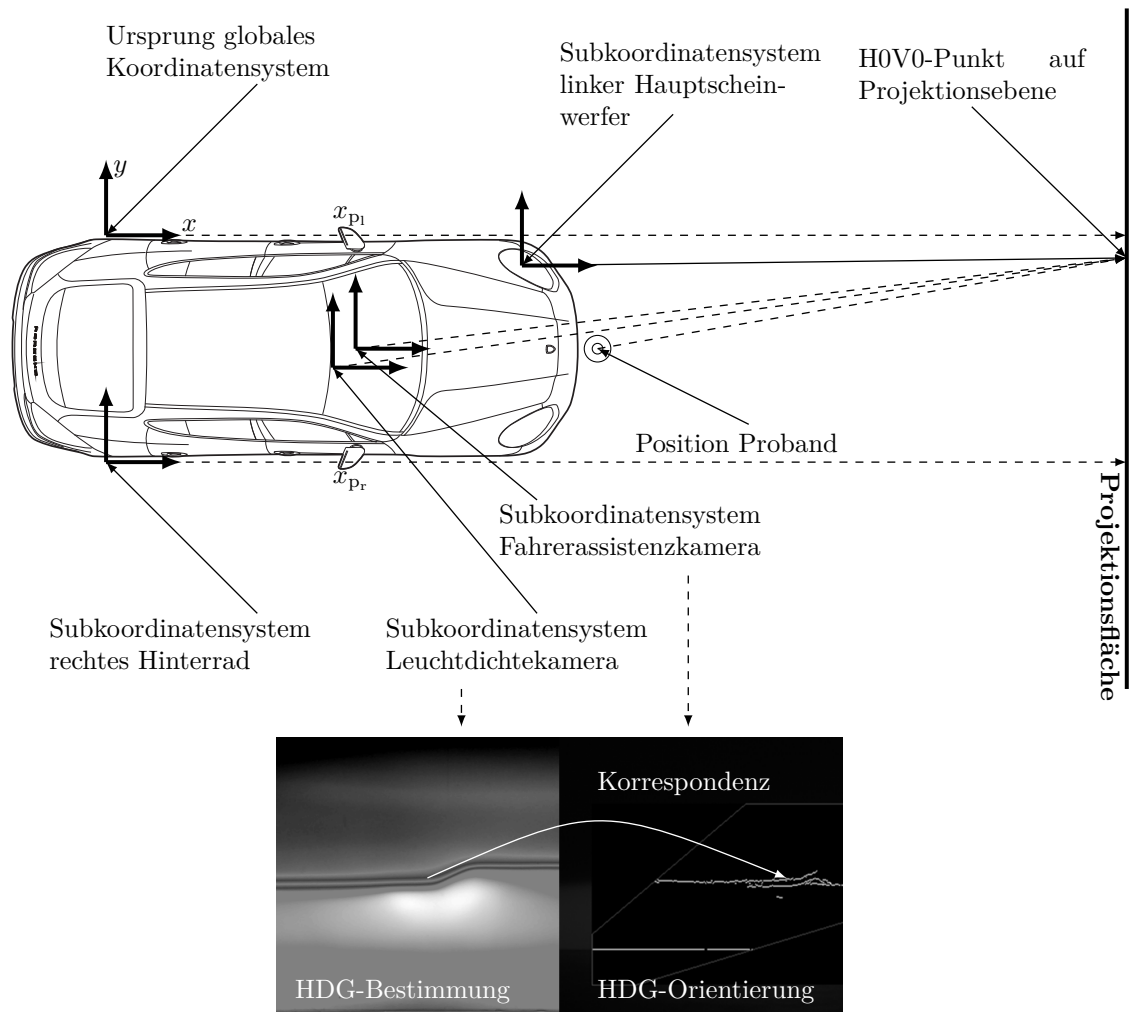


Abbildung B.2: Versuchsaufbau Probandenstudie und indirekte Leuchtdichtemessung

Die Lagebestimmung der HDG erfolgt subjektiv durch die Probanden und objektiv durch die indirekte Leuchtdichtemessung. Der Bestimmungsort der HDG wird an der Projektionsfläche durch eine magnetische Pfeilmarkierung visualisiert. Über die Fahrerassistenzkamera und das bekannte Geometriemodell wird die Orientierung der Pfeilmarkierung bestimmt, Abbildung B.2. In den Abbildungen B.3 und B.4 sind die Pfeilmarkierungen für helle und für dunkle Umfeldbedingungen dargestellt.

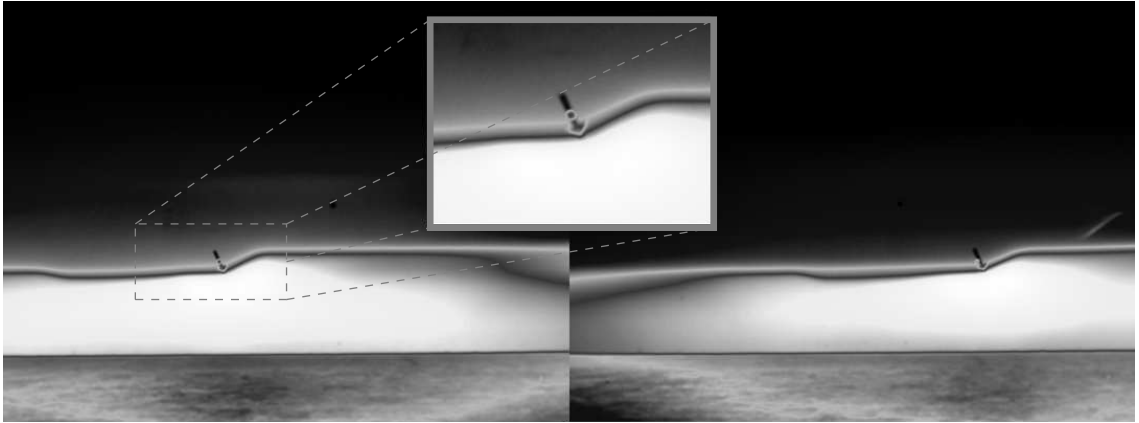


Abbildung B.3: Leuchtdichteaufnahme der markierten HDG bei dunkler Umfeldbeleuchtung

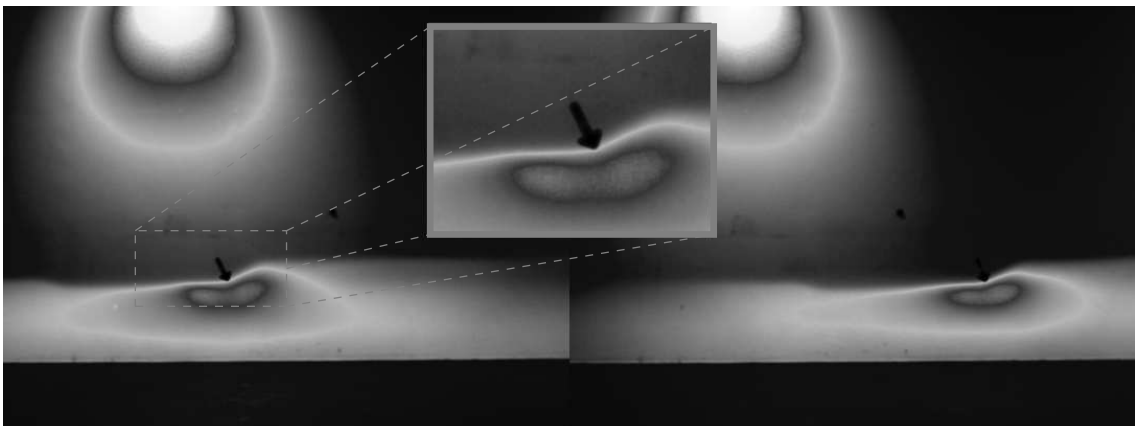


Abbildung B.4: Leuchtdichteaufnahme der markierten HDG bei heller Umfeldbeleuchtung

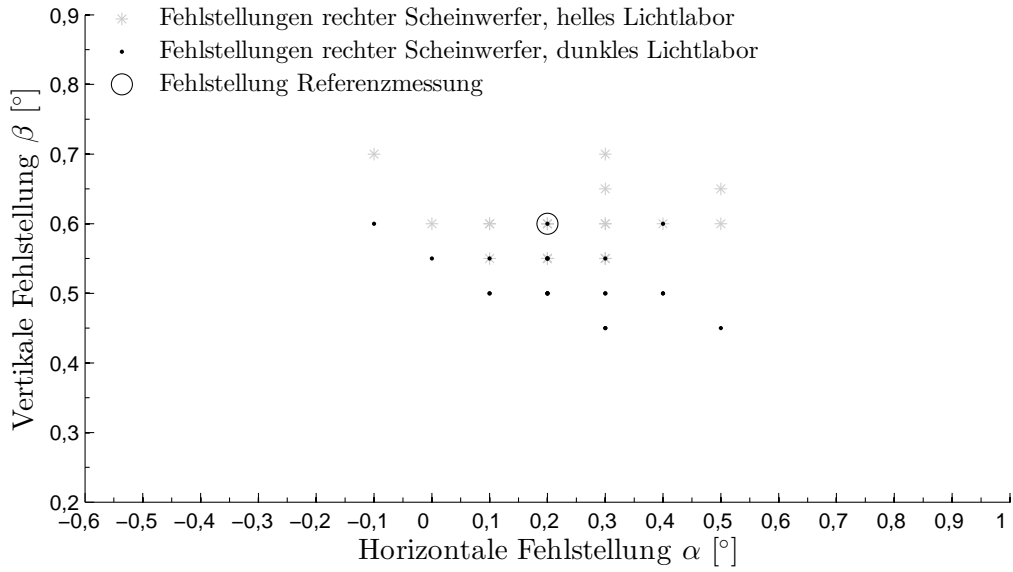


Abbildung B.5: Ergebnisse der visuell-manuellen Einstellung für den rechten Scheinwerfer in einer Entfernung von 10 m zwischen Scheinwerfer und Projektionsfläche

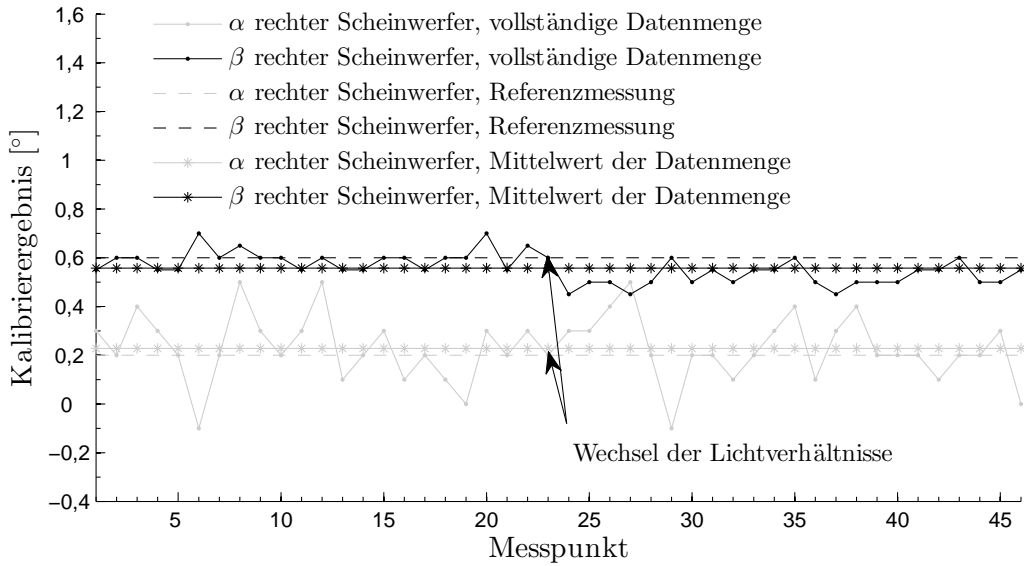


Abbildung B.6: Vergleich der Referenzmessung mit den Messwerten für den rechten Scheinwerfer bei der visuell-manuellen Einstellung

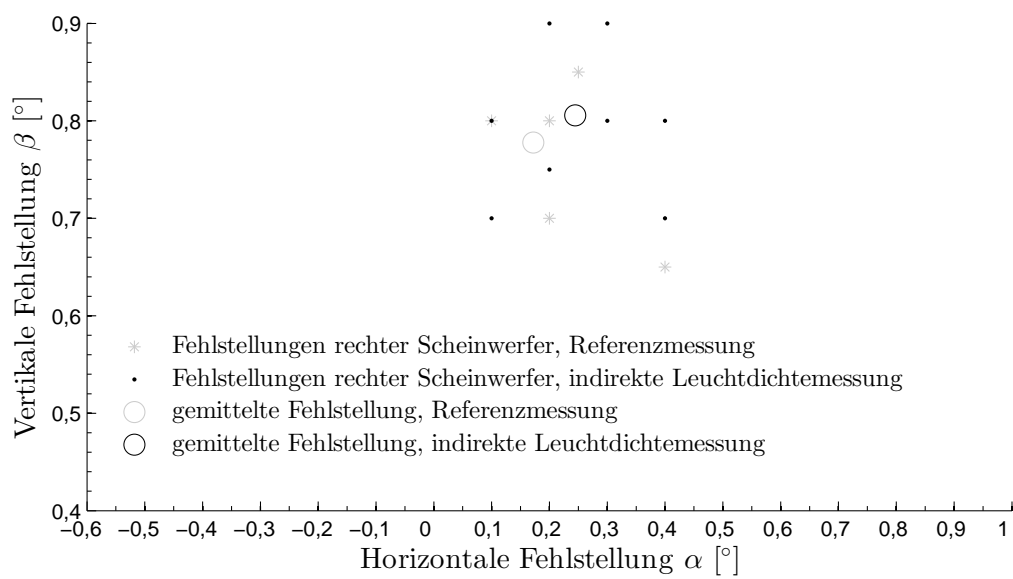


Abbildung B.7: Darstellung der Ergebnisse der indirekten Leuchtdichtemessung und der Referenzmessung des rechten Scheinwerfers in einer Entfernung von 7 m zwischen Scheinwerfer und Projektionsfläche

B.2 Messergebnisse

Die Messergebnisse der Kalibrierung mit jeweils zwei unterschiedlichen charakteristischen Punkten werden in Abschnitt B.2.1 aufbereitet. Die Unsicherheit der HDG-Detektion auf Basis der horizontalen und der vertikalen Kamerapixel ist Abschnitt B.2.2 zu entnehmen. Die Winkelversätze zwischen den HDGs werden in Abschnitt B.2.3 dargestellt.

B.2.1 Kalibrierergebnisse bei zwei charakteristischen Punkten

Die Abbildung B.8 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Kalibrierergebnisse für jeweils zwei charakteristische Punkte. Die verwendete Datenmenge wird in Abschnitt 6.3.3 zur Untersuchung der Detektionsdistanz genutzt. Insgesamt werden $w = 355$ Kalibriervorgänge mit $p = 11$ charakteristischen Punkten für die Darstellung betrachtet. Eine vergleichbare Auswertung weiterer Messergebnisse für den linken Hauptscheinwerfer ist auf Basis einer Datenmenge mit $w = 762$ Ausführungen Abschnitt 6.3.2 zu entnehmen.

Die gemittelte Fehlstellung mit der größten Häufigkeit nimmt die Werte $\beta_{N(2,355),-0,1^\circ \text{ bis } 0,1^\circ} = 0,9248^\circ$ und $\alpha_{N(2,355),-0,1^\circ \text{ bis } 0,1^\circ} = 0,0000^\circ$ an. Eine Auswertung aller charakteristischer Punkte führt zu $\beta_{N(11,355)} = 0,9486^\circ$ und $\alpha_{N(11,355)} = 0,0436^\circ$. Die in Abbildung B.8 dargestellten Kombinationen der charakteristischen Punkte beziehen sich auf den Bereich um die größte Häufigkeit. Signifikant ist die Mehrheit der bekannten links-diagonalen Anordnung der Punkte.

Die Abbildung B.9 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Kalibrierergebnisse für jeweils zwei charakteristische Punkte des rechten Scheinwerfers. Insgesamt werden $w = 405$ Kalibriervorgänge mit $p = 11$ charakteristischen Punkten für die Darstellung genutzt.

Die gemittelte Fehlstellung mit der größten Häufigkeit nimmt die Werte $\beta_{N(2,405),-1,0^\circ \text{ bis } -0,8^\circ} = 1,6108^\circ$ und $\alpha_{N(2,405),-1,0^\circ \text{ bis } -0,8^\circ} = -0,8996^\circ$ an. Eine Auswertung aller charakteristischer Punkte führt zu $\beta_{N(11,405)} = 1,0742^\circ$ und $\alpha_{N(11,355)} = -0,1526^\circ$. Die gemittelte Fehlstellung mit der zweitgrößten Häufigkeit nimmt die Werte $\beta_{N(2,405),-0,2^\circ \text{ bis } 0,0^\circ} = 1,0282^\circ$ und $\alpha_{N(2,405),-0,2^\circ \text{ bis } 0,0^\circ} = -0,1229^\circ$ an und zeigt eine Übereinstimmung mit dem Gesamtergebnis. Die in Abbildung B.9 dargestellten Kombinationen der charakteristischen Punkte beziehen sich auf den durch den Kreis markierten Bereich. Für den rechten Scheinwerfer scheint die rechts-diagonale Anordnung der charakteristischen Punkte signifikant.

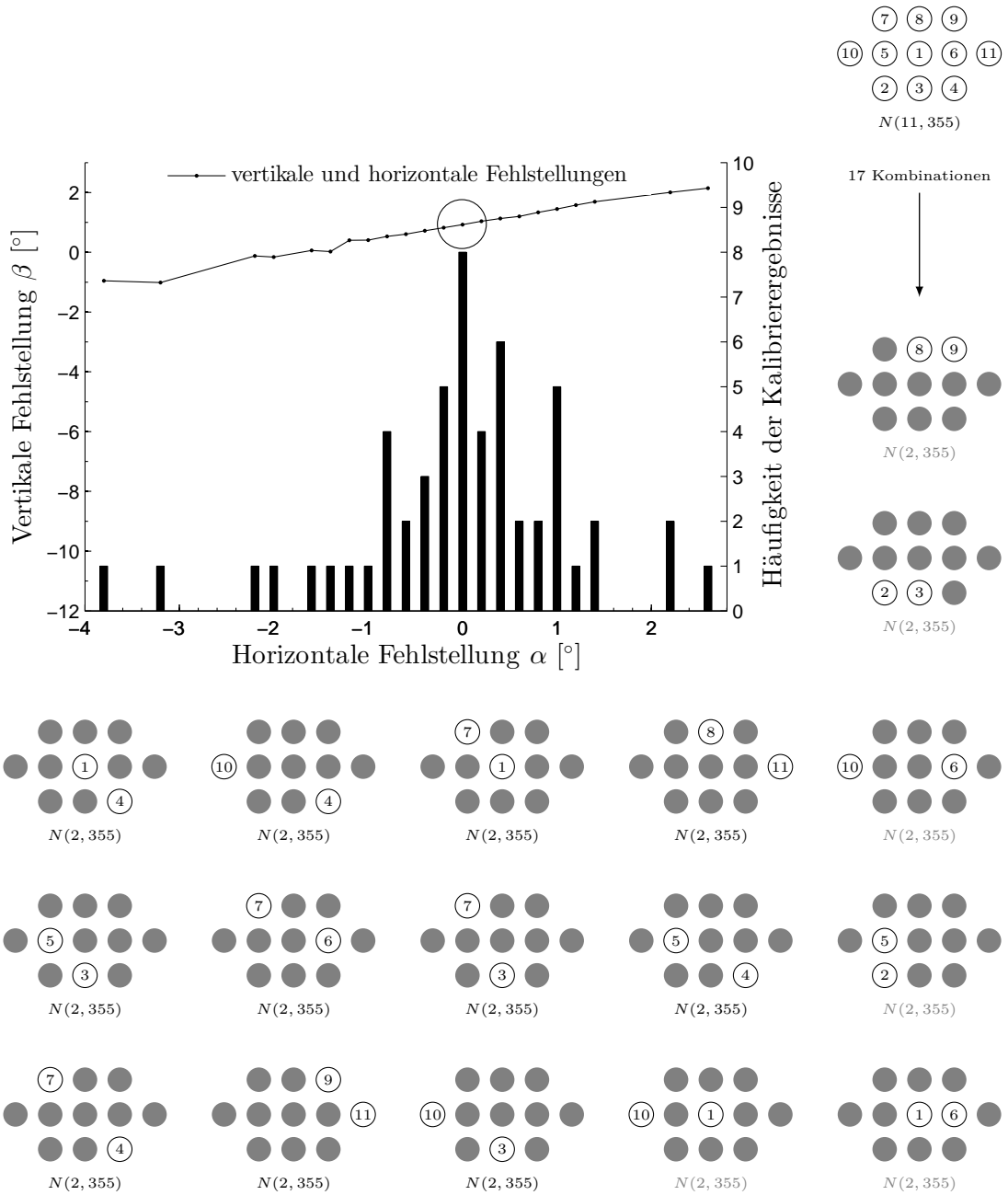


Abbildung B.8: Häufigkeitsverteilung der Kalibrierergebnisse für Kalibriervorgänge mit $N(2, 355)$ für den linken Hauptscheinwerfer

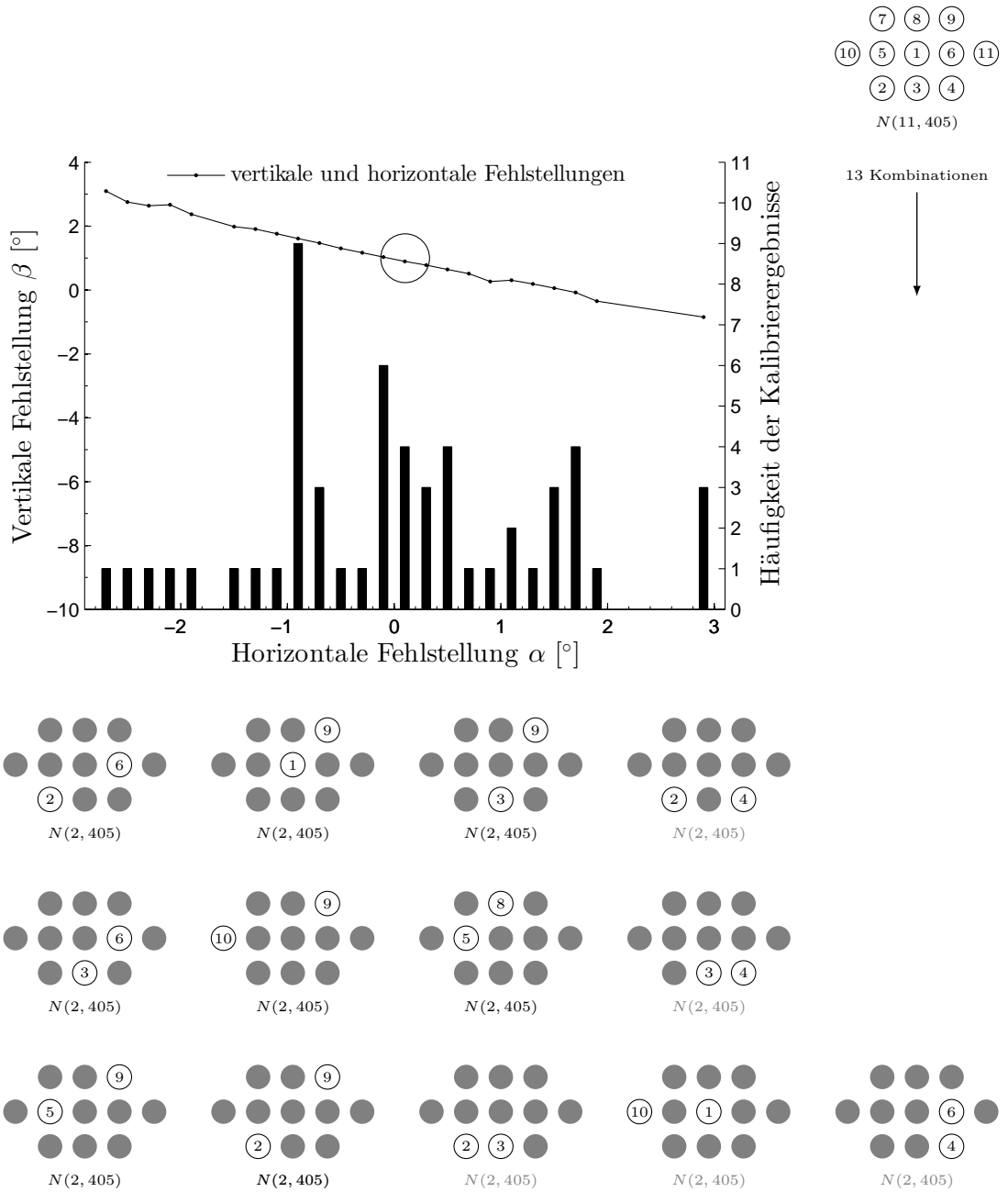


Abbildung B.9: Häufigkeitsverteilung der Kalibrierergebnisse für Kalibriervorgänge mit $N(2, 405)$ für den rechten Hauptscheinwerfer

B.2.2 Unsicherheit der HDG-Detektion

Zur Bestimmung der Unsicherheit der HDG-Detektion werden Daten des Serienscheinwerfers und Daten des Prototypenscheinwerfers ausgewertet. Durch eine Standardisierung werden die Messungen der HDG-Detektion aus unterschiedlichen charakteristischen Positionen in die jeweiligen Grundausrichtung des Scheinwerfers (Position 1) überführt, Abbildung B.10. Die Messergebnisse zeigen für die horizontalen Pixelpositionen des Serienscheinwerfers eine größere Streuung im Vergleich zu dem Prototypenscheinwerfer, Abbildungen B.11 und B.12.

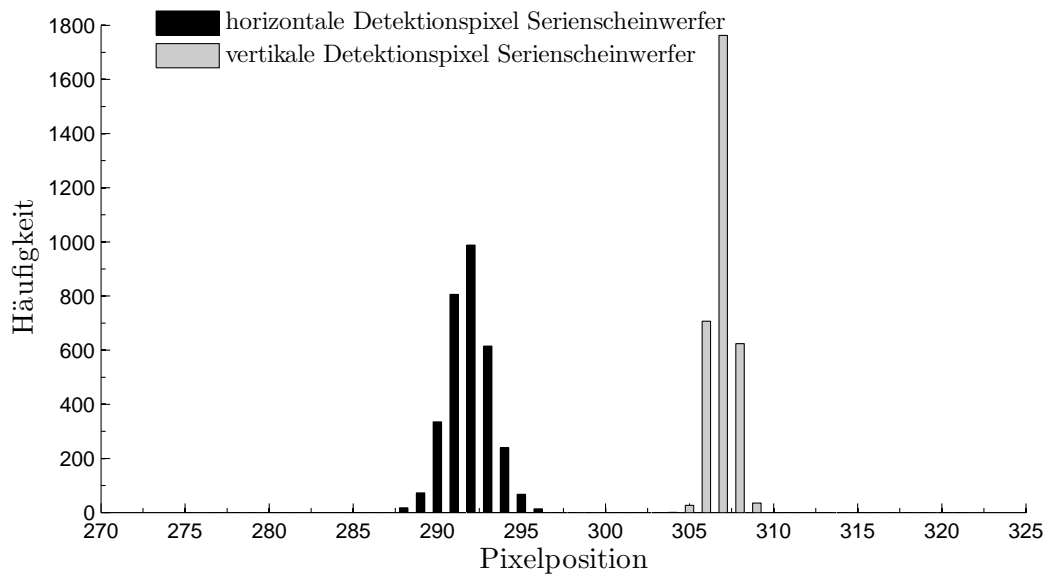


Abbildung B.10: Horizontale und vertikale Häufigkeitsverteilung bei der HDG-Detektion des Serienscheinwerfers (3157 Messpunkte)

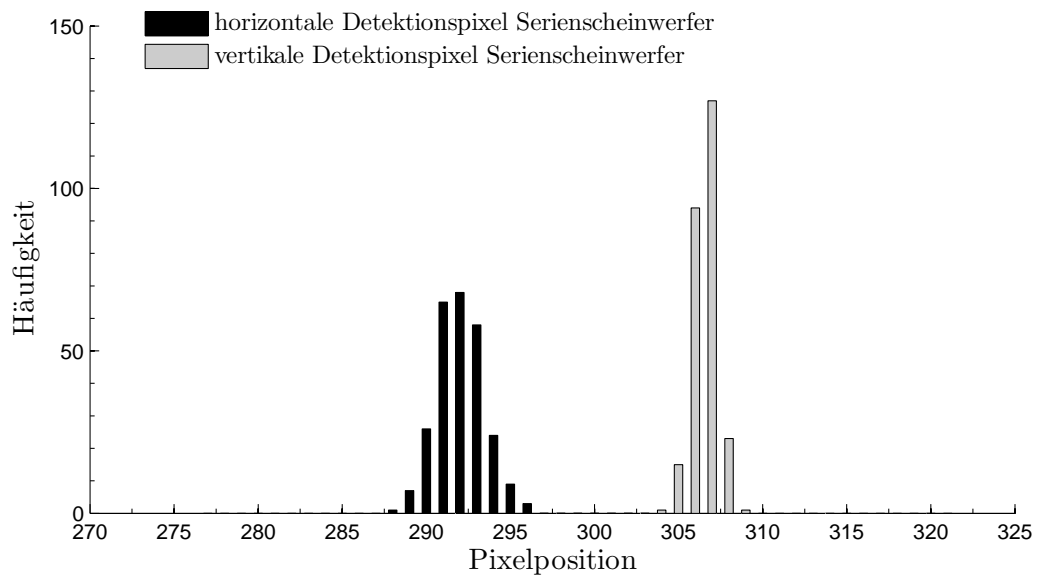


Abbildung B.11: Horizontale und vertikale Häufigkeitsverteilung bei der HDG-Detektion des Serienscheinwerfers (261 Messpunkte)

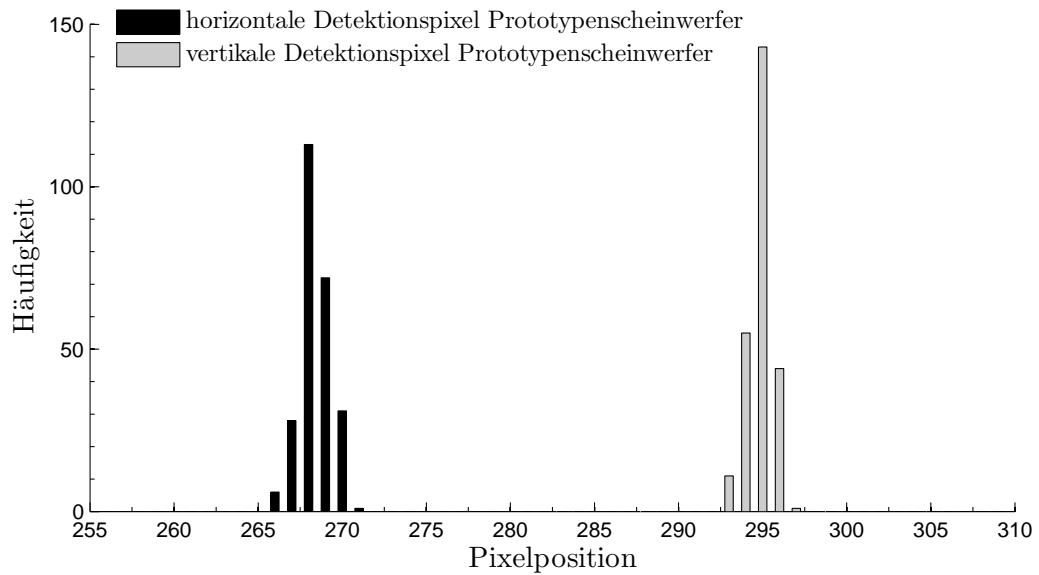


Abbildung B.12: Horizontale und vertikale Häufigkeitsverteilung bei der HDG-Detektion des Prototypenscheinwerfers (257 Messpunkte)

B.2.3 Winkelversätze zwischen den einzelnen Hell-Dunkel-Grenzen

Insgesamt werden durch die indirekten Leuchtdichtemessungen vier HDG-Klassen bestimmt, Abbildung B.13. Die HDG am Hotspot wird als HDG-Klasse 1 bezeichnet, dieser folgt die subjektiv wahrnehmbare HDG der Probandenstudie (HDG-Klasse 2). Der Farbsaum bildet ebenfalls eine detektierbare HDG (HDG-Klasse 3), wohingegen die HDG des Streulichts (HDG-Klasse 4) zu vernachlässigen ist, da diese nicht durch die Fahrerassistenzkamera erfasst werden kann.

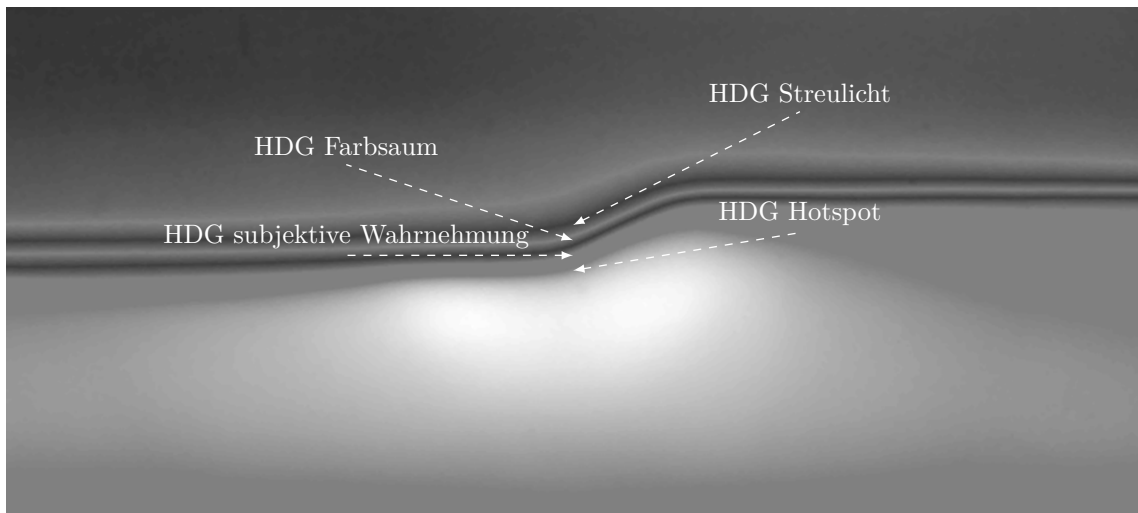


Abbildung B.13: Leuchtdichteaufnahme der unterschiedlichen Lagen der HDG

Der Winkelversatz zwischen der HDG 3 und der HDG 2 ist der Tabelle B.3 zu entnehmen. Die Winkelversätze zwischen der HDG 1 und 2 sowie der HDG 3 und 4 sind in Tabelle B.4 dargestellt.

Tabelle B.3: Winkelversatz zwischen Farbsaum-HDG und subjektiv wahrgenommener HDG im angegebenen Distanzbereich

Distanzen ab Hinterachse	linker Scheinwerfer		rechter Scheinwerfer	
	$\Delta\alpha_{\text{HDG}_{2-3}}$	$\Delta\beta_{\text{HDG}_{2-3}}$	$\Delta\alpha_{\text{HDG}_{2-3}}$	$\Delta\beta_{\text{HDG}_{2-3}}$
7,5 m	0,05°	0,40°	-0,20°	0,40°
8 m	-0,15°	0,40°	0,40°	0,15°
8,5 m	-0,05°	0,40°	0,00°	0,40°
9 m	-0,30°	0,40°	-0,05°	0,40°
9,5 m	-0,1°	0,60°	-0,10°	0,40°
10 m	-0,05°	0,40°	-0,10°	0,60°
10,5 m	0,00°	0,45°	0,00°	0,45°
11 m	0,00°	0,50°	0,00°	0,55°
11,5 m	-0,25°	0,50°	0,00°	0,30°
12 m	-0,05°	0,20°	0,20°	0,35°
12,5 m	0,25°	0,40°	-0,20°	0,30°
13 m	-0,10°	0,30°	-0,10°	0,40°
$\mu_{\Delta_{\text{HDG}}}$	-0,0625°	0,4125°	-0,0125°	0,3917°
$\sigma_{\Delta_{\text{HDG}}}$	0,1416°	0,1003°	0,1680°	0,1165°

Tabelle B.4: Winkelversatz zwischen Farbsaum-HDG und Streulicht-HDG sowie subjektiv wahrgenommener HDG und Hotspot-HDG im angegebenen Distanzbereich

Distanzen ab Hinterachse	Streulicht, Farbsaum		subjektive HDG, Hotspot	
	$\Delta\beta_{\text{HDG}_{3-4}}$ linker SW	$\Delta\beta_{\text{HDG}_{3-4}}$ rechter SW	$\Delta\beta_{\text{HDG}_{1-2}}$ linker SW	$\Delta\beta_{\text{HDG}_{1-2}}$ rechter SW
7 m	0,25°	0,15°	0,40°	0,45°
8 m	0,30°	0,30°	0,45°	0,50°
9 m	0,35°	0,50°	0,40°	0,35°
10 m	0,30°	0,35°	0,30°	0,30°
11 m	0,30°	0,35°	0,20°	0,25°
$\mu_{\Delta_{\text{HDG}}}$	0,30°	0,33°	0,35°	0,37°

C Bildverarbeitung und Messdaten

C.1 Bildverarbeitung

Die ROI wird entsprechend der Verfahrenswinkel der Scheinwerfer horizontal angepasst. In Abbildung C.1 sind die wechselnden Polygone für einen Kalibrierablauf mit neun Positionen gezeigt. Eine Referenz in der Mitte eines jeden Einzelbilds visualisiert die Verlagerung der Lichtverteilung und der Sub-Region.

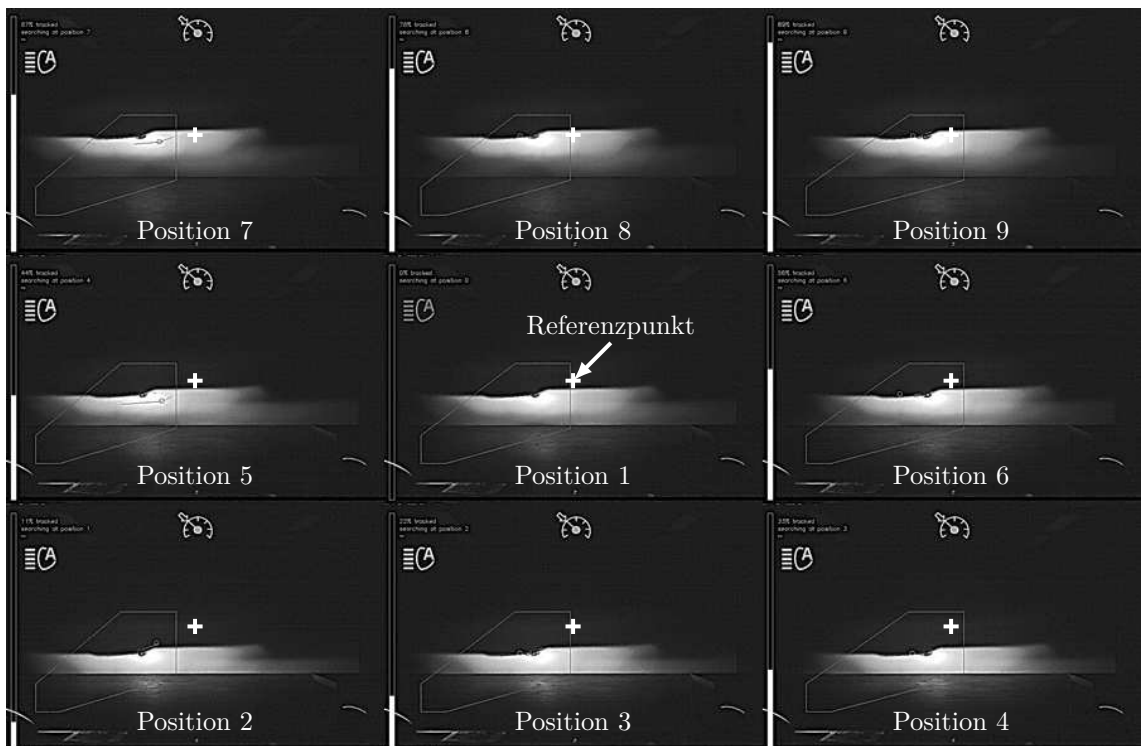


Abbildung C.1: Kalibrierablauf mit 9 Verfahrenspositionen und variabler ROI

Durch die adaptive Bildverarbeitung ist ein Wechsel der Umfeldleuchtdichte während der Ausführung des Kalibrierverfahrens kompensierbar. In Abbildung C.2 ist die HDG unter hellen und unter dunklen Laborbedingungen aufgenommen. Die ableitbaren Kantendarstellungen zeigen keine signifikanten Änderungen. Die Orientierung des detektierten HOV0-Punkts bleibt trotz der Veränderung der Umfeldleuchtdichte konstant.

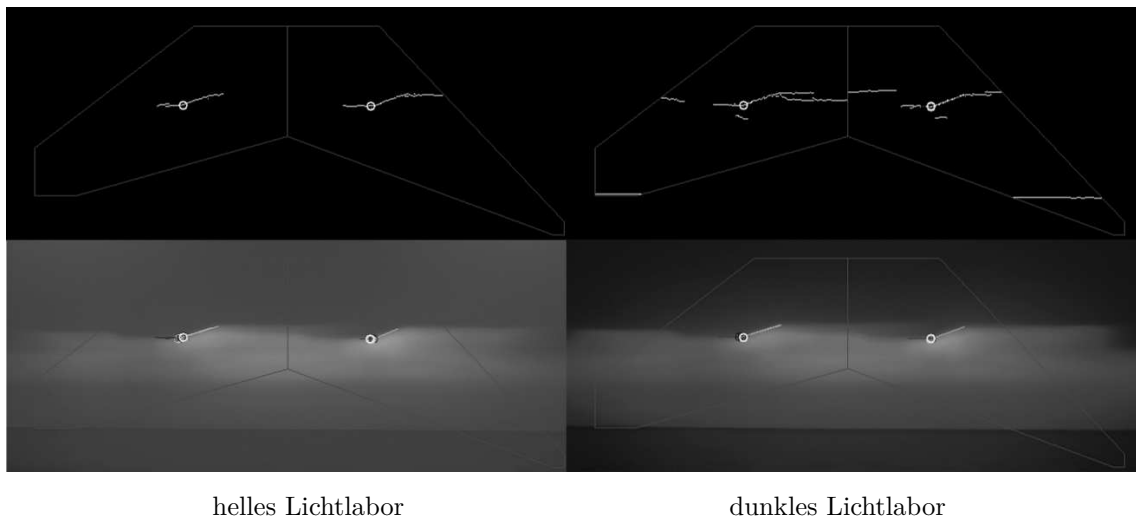


Abbildung C.2: H0V0-Erkennung bei unterschiedlichen Umfeldleuchtdichten

C.2 Messdaten

In den Versuchsträgern werden die Messdaten eines jeden Kalibrierablaufs in einer Datei gespeichert. Die Abbildungen C.3 und C.4 zeigen die gespeicherten Informationen. Für die finale Berechnung der Scheinwerferfehlstellung sind die Pixelpositionen auf dem Kamerabild (Spalte B und C) und die Verfahrenswinkel der Scheinwerfer (Spalte D und E) relevant. Die Informationen in den Spalten F bis R werden für die Klassifizierung der HDG-Lage verwendet. Die Ergebnisse des jeweiligen Kalibrierprozesses stehen in Spalte T und V. Die entsprechenden Spannbreiten der Einzelergebnisse sind den Spalten U und W zu entnehmen. Für statische Kalibriersituationen ist in Spalte X die Distanz zwischen der Hinterachse des Versuchsträgers und der Projektionsfläche aufgeführt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
67														
68	Pos_ID	Pixel_h	Pixel_v	Phi[°]	Theta[°]	Houghwert-Sta	Houghwert-Sta	Houghwert-End	Houghwert-End	Houghwert-Sta	Houghwert-Sta	Houghwert-End	Houghwert-End	Image
69	0	347	272	0.025	0.0375	256	57	270	55	272	54	295	44	
70	1	285	313	2.0125	1.5375	202	97	220	97	228	94	236	91	
71	2	329	310	-0.025	1.5375	230	93	249	93	252	92	271	84	
72	3	359	307	-1.95	1.4625	206	90	265	90	268	89	291	78	
73	4	323	267	2.0375	-0.05	252	50	258	50	263	49	279	40	
74	5	367	279	-2.0125	0.025	262	63	275	63	276	62	292	55	
75	6	293	259	2.0375	-1.45	217	42	228	42	231	41	249	34	
76	7	360	238	-0.0375	-1.45	253	21	282	21	286	19	300	12	
77	8	389	237	-2.0375	-1.55	284	21	296	21	299	20	312	14	
78	9	283	271	3.95	-0.0375	208	54	219	54	222	52	247	41	
79	10	390	283	-4.05	-0.05	282	66	300	66	301	65	318	58	
80														
81	Pos_ID	Pixel_h	Pixel_v	Phi[°]	Theta[°]	Houghwert-Sta	Houghwert-Sta	Houghwert-End	Houghwert-End	Houghwert-Sta	Houghwert-Sta	Houghwert-End	Houghwert-End	Image
82	0	358	263	-0.0125	-0.0125	262	49	281	48	284	47	300	40	
83	1	290	309	2.05	1.475	147	92	225	92	228	91	252	80	
84	2	323	309	-0.025	1.5	229	92	248	92	249	91	267	83	
85	3	356	309	-2.0375	1.55	245	92	265	93	270	91	281	86	
86	4	297	287	1.9625	0.05	210	66	234	66	235	66	253	57	
87	5	382	271	-1.95	-0.025	253	54	286	54	293	52	314	40	
88	6	306	251	2.0375	-1.4875	228	34	243	34	246	32	257	28	
89	7	326	259	0.025	-1.5	220	42	249	42	252	41	266	34	
90	8	357	259	-2	-1.5	242	43	265	43	266	43	287	32	
91	9	296	261	4.0375	0.0375	216	45	234	44	235	44	251	37	
92	10	390	282	-4.025	-0.0375	268	66	297	66	300	65	318	57	
93														

Abbildung C.3: Auszug der gespeicherten Messdaten für den linken Scheinwerfer Teil 1

Auf Basis der gespeicherten Informationen kann für die Auswertung der Messergebnisse die Unsicherheit der Detektion der H0V0-Punkte bestimmt werden, vergleiche Anhang B.2.2. Ebenso kann der Einfluss einer veränderten Anzahl an charakteristischen Punkten für eine Kalibrierung nachträglich untersucht werden, siehe Anhang B.2.1.

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
67													
68	Houghwert-End	Image-Thresho	Image-Thresho	Image-Globale	Image-Histogr	Image-Histogr	medianAlpha[°]	rangeAlpha[°]	medianBeta[°]	rangeBeta[°]	medianDis	rangeDis	
69	44	27	30	0.231373	5	64	3						
70	91	27.9	31	0.278431	4	76	3						
71	84	29.7	33	0.25098	5	69	3						
72	78	25.2	28	0.219608	5	61	3						
73	40	26.1	29	0.227451	4	62	3						
74	55	29.7	33	0.254902	6	71	3						
75	34	27	30	0.223529	4	61	3						
76	12	19.8	22	0.172549	5	50	3						
77	14	19.8	22	0.176471	5	50	3						
78	41	25.2	28	0.243137	3	65	3						
79	58	27	30	0.247059	6	69	3	-0.102459	1.77478	0.545835	1.04667	12.5843	6.72822
80													
81	Houghwert-End	Image-Thresho	Image-Thresho	Image-Globale	Image-Histogr	Image-Histogr	medianAlpha[°]	rangeAlpha[°]	medianBeta[°]	rangeBeta[°]	medianDis	rangeDis	
82	40	21.6	24	0.2	3	54	3						
83	80	25.2	28	0.247059	4	67	3						
84	83	25.2	28	0.231373	5	64	3						
85	86	29.7	33	0.262745	4	71	3						
86	57	30.6	34	0.270588	4	73	3						
87	40	27.9	31	0.223529	3	60	3						
88	28	27.9	31	0.223529	7	64	3						
89	34	25.2	28	0.219608	4	60	3						
90	32	25.2	28	0.211765	6	60	3						
91	37	19.8	22	0.2	5	56	3						
92	57	27	30	0.258824	5	71	3	-0.0315969	1.60338	0.557597	0.917195	12.7729	6.84726
93													

Abbildung C.4: Auszug der gespeicherten Messdaten für den linken Scheinwerfer Teil 2

D Hardware und Software

D.1 Entwicklerkamarasystem

Das Entwicklerkamarasystem der Firma Hella Aglaia Mobile Vision bietet die Möglichkeit auf das Rohbild der Kamera zuzugreifen. Das zur Verfügung stehende Entwicklersystem enthält zusätzlich die Entwicklungsumgebung *Cassandra*. In dieser Umgebung sind vorgefertigte Operationsblöcke implementiert, die grundlegende Bildverarbeitungsoperationen ermöglichen. Ebenso ist es möglich eigene Funktionsblöcke zu implementieren. Die integrierbaren DLLs werden mittels C++ programmiert. *Cassandra* bietet darüber hinaus die Möglichkeit die Funktionsblöcke zu einem Gesamtsystem anzuordnen und diese Konfiguration zu speichern. Der beschriebene Systemablauf der automatisierten Scheinwerfereinstellung in Kapitel 5 zeigt die einzelnen Funktionsblöcke, die in *Cassandra* implementiert sind.

Tabelle D.1: Kenndaten der Fahrerassistenzkamera der Firma Hella-Aglaia Mobile Vision

Parameter	Technische Daten
CMOS-Bildsensor	KODAK-KAC00401
Pixelauflösung	768 × 486
Übertragungsrate	25 Bilder/s
Dynamikbereich	12 bit
Wellenlängenbereich	350 nm - 800 nm
Winkelbereich	horizontal 41°, vertikal 26°

In Tabelle D.1 sind die technischen Daten des Entwicklerkamarasystems angegeben. Die intrinsische und die extrinsische Kalibrierung werden initial durch Hella Aglaia durchgeführt und zur Verfügung gestellt. Die Kalibriermatrix liegt in Form einer CSV-Datei vor.

D.2 Leuchtdichtekamera

Die Leuchtdichtekamera LMK 5 color der Firma Techno-Team wird als Referenzmesssystem genutzt. Eine intrinsische Kalibriermatrix liegt vor, jedoch ist aufgrund des Korrespondenzverfahrens, Anhang B.1.2, die Pixelposition auf dem Kamerabild ausreichend. Eine orts aufgelöste Auswertung des Lichtbilds steht im Vordergrund. Die absoluten Leuchtdichtewerte sind ebenfalls nicht relevant, da für die

HDG-Bestimmung lediglich die Gradienten interessant sind. Die Leuchtdichtekamera wird nur unter Laborbedingungen eingesetzt. Die technischen Daten der Kamera sind Tabelle D.2 zu entnehmen.

Tabelle D.2: Kenndaten der Leuchtdichtekamera LMK 5 color der Firma Techno-Team

Parameter	Technische Daten
CCD-Bildsensor	Sony-CCD ICX 285 AL
Standard-Pixelauflösung	1380 × 1030
Dateninterface	Gigabit Ethernet Interface
Dynamikbereich	1 : 10000000 (\approx 140 dB)
Belichtungszeiten	1 s bis zu 15 s

D.3 CANLog

Der CANLog wird als Datenlogger verwendet, der ganze CAN-Botschaften oder einzelne CAN-Signale empfängt, filtert und sendet. Im Speziellen kann eine Gateway-Funktion genutzt werden. Hierbei wird ein Steuergerät durch den CANLog von dem eigentlichen CAN-Bus getrennt. Abhängig von der CANLog-Konfiguration werden definierte Botschaften bzw. Signale zwischen CAN-Bus und Steuergerät ausgetauscht oder bewusst unterdrückt. Gleichzeitig ist ein zeitversetztes routen der Daten möglich. Ebenso ist das Lesen bzw. das Senden auf den verschiedenen CAN-Kanälen des CANLogs abhängig von Eingangsinformationen eines weiteren CAN-Kanals möglich. Die technischen Daten der verwendeten CANLogs sind Tabelle D.3 zu entnehmen

Tabelle D.3: Kenndaten der CANLogs 3 und 4 der Firma Vector

Parameter	Technische Daten
CAN-Kanäle	4×CAN, 1×Messkanal
CAN-Schnittstelle	Highspeed, Lowspeed
Speicher	2 MB optional CANLog 3: Flash-Speicher mit 64 MB optional CANLog 4: Flash-Card mit 64 MB
Datentransfer	CANLog 3: RS232 CANLog 4: USB 2.0, USB 1.1
Logger Kapazität für 64MB	4,3 Millionen Botschaften (DLC 8)
Datenexport	ASC, BLF, MDF und TXT
Spannungsversorgung	5 V...45 V
Stromaufnahme	135 μ A
Schlafmodus	
Temperaturbereich	-40°C...+70°C
Abmessungen	CANLog 3: 134 × 84 × 35 mm CANLog 4: 140 × 144 × 37 mm

D.4 Sonstiges

Die Auswertung der Messdaten wird mit Matlab durchgeführt. Die Simulationsumgebung zur theoretischen Betrachtung des Systems ist ebenfalls in Matlab implementiert. Die Programmierung der DLLs in Cassandra, Anhang D.1, erfolgt in Visual Studio 2012. Für die Ansteuerung der Hauptscheinwerfer wird ein CANcaseXL der Firma Vector verwendet. Die notwendigen CAN-Botschaften und CAN-Signale werden den vorgegebenen CAN-Matrizen des entsprechenden Fahrzeugs entnommen. Die geometrischen Beziehungen zwischen der Hinterachse, der Vorderachse und den Scheinwerfern des jeweiligen Fahrzeugs sind aus den CAD-Daten bekannt. Die Anbauposition der Entwicklerkamera wird in Bezug zur Mitte der Vorderachse durch die Firma Hella Aglaia bestimmt und zur Verfügung gestellt.

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
AFS	adaptives Frontbeleuchtungssystem
ALWR	automatische Leuchtweitenregulierung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer-aided design
CAN	Controller Area Network
CCD	Charge Coupled Device
CLAHE	Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CSV	Comma-separated values
et al.	und andere
DBSCAN	Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise
DKL	dynamisches Kurvenlicht
DLL	Dynamic Link Library
ECE	Economic Commission of Europe
FLA	Fernlichtassistent
fps	frames per second
GLW	gleitende Leuchtweite
HDG	Hell-Dunkel-Grenze
LED	lichtemittierende Diode
Lidar	Light detection and ranging
LVQ	Lernende Vektor Quantisierung
MDF	maskiertes Dauerfernlicht
MXB	Matrixbeam
Pkw	Personenkraftwagen

Radar	Radio detection and ranging
ROI	Region of Interest
SAE	Society of Automotive Engineers
SEEL	Solutions for Energy Efficient Lighting
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SW	Scheinwerfer

Formelzeichen

Lateinische Notation

A	Empfängerfläche
a_p	Ebenenparameter
b_p	Ebenenparameter
c_p	Ebenenparameter
D_{DBSCAN}	Abstand im Bildraum
D_x	Drehmatrix Drehung um die x-Achse
D_y	Drehmatrix Drehung um die y-Achse
D_z	Drehmatrix Drehung um die z-Achse
D'_y	Drehmatrix in y-Richtung Ableitung
D'_z	Drehmatrix in z-Richtung Ableitung
d	Abstand im Hough-Raum
d_p	Ebenenparameter
E_e	Bestrahlungsstärke
E_v	Beleuchtungsstärke
e_p	Ebenenparameter
\vec{E}, \vec{E}_p	Ebene
f	Winkelfaktor
f_p	Ebenenparameter
\vec{F}	6-dimensionale Funktion für das <i>Newton-Verfahren</i>
\vec{f}	n-dimensionale Funktion
\mathcal{G}	Berechnung Position des H0V0-Punkts im globalen Koordinatensystem
G	maximaler Grauwerte
G_v	Gradient eines vertikalen Beleuchtungsstärkeverlaufs

$G_{v,\max}$	lokale Maxima des Gradientenverlaufs
g	Gerade
\vec{g}_{HDG}	Position des HOV0-Punkts im globalen Koordinatensystem
$Hist_{\max}$	maximaler Histogrammwert
$Hist_{\min}$	minimaler Histogrammwert
$h(j)$	Histogrammwert im Ursprungsbild
$\bar{h}(i)$	Häufigkeit eines Grauwerts im kumulativen Grauerthistogramm
\bar{h}_{\min}	minimale kumulative Häufigkeit
$I(x_i, y_i)$	Punkt im Bildraum
i	kumulierter Grauwert, Zählindex
$\vec{i}(n, m)$	Pixelposition im Bild der Fahrerassistenzkamera
$J(x_j, y_j)$	Punkt im Bildraum
$J_{\mathcal{F}}$	Jacobi-Matrix
j	Grauwert
j'	Grauwert nach Kontrastanpassung
\mathcal{K}	Zuordnungsvorschrift Kalibriermatrix
\mathcal{K}^{-1}	inverse Zuordnungsvorschrift Kalibriermatrix
$K_0(t), K_1(t)$	Grauwertklasse
\vec{k}	Detektionsrichtung Fahrerassistenzkamera in Kugelkoordinaten
\vec{k}, \vec{k}_p	Detektionsrichtung Fahrerassistenzkamera
$\vec{k}_{n,m}$	diskrete Detektionsrichtung Fahrerassistenzkamera in Kugelkoordinaten
$\vec{k}_{n,m}$	diskreter Detektionsvektor Fahrerassistenzkamera
$\vec{k}_{n,m,\text{global}}$	detektierter Punkt im globalen Koordinatensystem

l_{Anstieg}	Länge des Anstiegs
$l_{\text{Horizontale}}$	Länge der Horizontalen
\vec{l}_{n_1, m_1}	Parameter
\vec{l}_{n_2, m_2}	Parameter
L_v	Leuchtdichte
$M \times N$	Gesamtzahl der Pixel
$MAD(\mathbf{X})$	Median der absoluten Abweichungen
$Med(\mathbf{X})$	Median
$N(p, w)$	Anzahl der Einzelergebnisse
n	Index Zeile, Zählindex
m	Index Spalte
n_v	Brechungsindex
\vec{n}_0	Normaleneinheitsvektor
\mathcal{P}	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion Gleichverteilung
$P[Z = j]$	Wahrscheinlichkeit eines Grauwerts
$P_0(t), P_1(t)$	Wahrscheinlichkeit der Grauwertklasse
$P_{\text{DBSCAN}, \min}$	minimale Anzahl an Punkten
$P_{v, \beta}$	horizontaler Verlauf der HDG
p	Anzahl der charakteristischen Punkte, Zählindex
$p(j)$	Häufigkeit eines Grauwerts im Ursprungsbild
$p'(j)$	Wahrscheinlichkeit eines Grauwerts
\vec{p}	Einheitsvektor
$\vec{p}_{0, \text{SW}}, \vec{p}_0$	Soll-Ausrichtung des Scheinwerfers
$\vec{p}_{\text{global}}(\alpha, \beta)$	Position des H0V0-Punkts im globalen Koordinatensystem
\vec{p}_{SW}	Ist-Ausrichtung des Scheinwerfers
\vec{p}'_{SW}	Ist-Ausrichtung des Scheinwerfers unter Berücksichtigung der Verfahrenswinkel
$Q(t)$	Varianzenverhältnis

$\vec{q}_{0,1,1}$	Parameter
$\vec{q}_{0,1,2}$	Parameter
\mathbb{R}	reelle Zahlen
R_1, R_2	Radius
\mathbf{r}	Kugelkoordinate
r, r_1, r_2	Skalierungsfaktor
\vec{r}_0	Anbauposition Fahrerassistenzkamera
$\mathcal{S}_{\text{kont}}$	Berechnung Detektionsrichtung
$\mathcal{S}_{\text{kont,Kugel}}$	Berechnung Detektionsrichtung in Kugelkoordinaten
$S(\mathbf{X})$	Stichprobenstandardabweichung
S_{Pos}	logisches Signal
s, s_1, s_2	Abstand Scheinwerfer zu abgebildetem HOV0-Punkt
$\vec{s}_{0,1}$	Anbauposition linker Scheinwerfer
T_1	minimaler Canny-Schwellwert
T_2	maximaler Canny-Schwellwert
t	Schwellwert Varianzanalyse
u	Skalierungsfaktor
$V(\lambda)$	spektrale Hellempfindlichkeitskurve
v	Skalierungsfaktor
w	Wiederholrate des Kalibrierablaufs
$\mathcal{X}_{\vec{E}_p}$	stetige Zufallsvariable Detektionsdistanz
$\mathcal{X}_{\phi_p, \theta_p}$	stetige Zufallsvariable Verfahrwinkel-Offset
\mathbf{X}	Menge der Tupel
\mathbf{X}'	gefilterte Menge der Tupel
X_n	Tupel der Einzellösungen
x_i, x_j	diskrete Koordinaten im Bildraum
x_p	Ebenenparameter
x_{p1}	Abstand Hinterachse links zu Projektionsfläche

x_{pr}	Abstand Hinterachse rechts zu Projektionsfläche
x_ϕ	horizontaler Verfahrwinkel-Offset
x_θ	vertikaler Verfahrwinkel-Offset
\vec{x}	n-dimensionaler Vektor
\vec{x}_0	Startvektor
\vec{x}_g	Richtungsvektor
\vec{x}_k, \vec{x}_{k+1}	rekursiver Vektor
y_i, y_j	diskrete Koordinaten im Bildraum
y_p	Ebenenparameter
\mathbb{Z}	ganze Zahlen
$\mathcal{Z}_{n,m}$	diskrete Zufallsvariable Pixel-Offset
Z	Zufallsvariable Varianzanalyse
$Z_{z\text{-Score}}$	Standardisierung
z_p	Ebenenparameter
z_{ph}	Abstand Radnabe zu Laborboden

Griechische Notation

α	horizontale Fehlstellung des Scheinwerfers
α_0	horizontale Soll-Ausrichtung des Scheinwerfers, Scheinwerfer-Gierwinkel
$\alpha_{0'}$	horizontale Ausrichtung des Scheinwerfers mit Fehlstellung
$\alpha_{1,2}, \alpha_n$	Einzellösung der horizontalen Fehlstellung
α_{LMK}	horizontale Winkel indirekte Leuchtdichtemessung
$\alpha_{N(p,w)}$	horizontale Fehlstellung eines Kalibrierdurchgangs
$\alpha_{N(p,w),Med}$	Median horizontale Fehlstellung eines Messdurchgangs

$\alpha_{N(p,w),\mu}$	Mittelwert horizontale Fehlstellung eines Messdurchgangs
$\alpha_{\Sigma N(p,w),Med}$	Median horizontale Fehlstellung mehrerer Messdurchgänge
β	vertikale Fehlstellung des Scheinwerfers
β_0	vertikale Soll-Ausrichtung des Scheinwerfers, Scheinwerfer-Nickwinkel
β_0'	vertikale Ausrichtung des Scheinwerfers mit Fehlstellung
$\beta_{1,2}, \beta_n$	Einzellösung der vertikalen Fehlstellung
β_{LMK}	vertikale Winkel indirekte Leuchtdichtemessung
$\beta_{N(p,w)}$	vertikale Fehlstellung eines Kalibrierdurchgangs
$\beta_{N(p,w),Med}$	Median vertikale Fehlstellung eines Messdurchgangs
$\beta_{N(p,w),\mu}$	Mittelwert vertikale Fehlstellung eines Messdurchgangs
$\beta_{\Sigma N(p,w),Med}$	Median vertikale Fehlstellung mehrerer Messdurchgänge
δ	Drehwinkel um die y-Achse
Δx	x-Richtung Relativbeziehung Scheinwerfer zu Kamera
Δy	y-Richtung Relativbeziehung Scheinwerfer zu Kamera
$\Delta y_{Hinterachse}$	Breite der Hinterachse
Δz	z-Richtung Relativbeziehung Scheinwerfer zu Kamera
$\Delta \vec{x}_{k,k+1}$	Differenzvektor
$\Delta \alpha$	Winkelversatz horizontale Fehlstellung

$\Delta\beta$	Winkelversatz vertikale Fehlstellung
$\Delta\phi$	horizontale Verfahrenwinkeldifferenz
$\Delta\phi_{\max}$	maximale horizontale Verfahrenwinkeldifferenz
$\Delta\phi_{\max,DKL}$	maximale horizontale Verfahrenwinkeldifferenz DKL
$\Delta\theta$	vertikale Verfahrenwinkeldifferenz
$\Delta\theta_{\max}$	maximale vertikale Verfahrenwinkeldifferenz
$\Delta\theta_{\max,ALWR}$	maximale vertikale Verfahrenwinkeldifferenz ALWR
ϵ	Drehwinkel um die z-Achse
ϕ, ϕ_p	horizontaler Verfahrenwinkel Stellmotor, LED-Anordnung
Φ_e	Strahlungsfluss, Strahlungsleistung
Φ_v	Lichtstrom
φ	Kugelkoordinate
$\varphi_{n,m}$	diskreter horizontaler Detektionswinkel Fahrerassistenzkamera
γ	Drehwinkel um die x-Achse
η	Winkel zwischen der Horizontalen und dem Anstieg
κ_v	Krümmung des horizontalen Verlaufs der HDG
$\kappa_{v,\max}$	maximale Krümmung
λ	Wellenlänge
μ	Erwartungswert
$\mu(\mathbf{X})$	Stichprobenmittelwert
$\mu_0(t), \mu_1(t)$	bedingter Erwartungswert der Grauwertklasse
$\mu_{\vec{E}_p}$	Erwartungswert Detektionsdistanz
$\mu_{n,m}$	Erwartungswert Pixel-Offset
μ_α, μ'_α	Mittelwert horizontale Fehlstellung mehrere Messdurchgänge

μ_β, μ'_β	Mittelwert vertikale Fehlstellung mehrere Messdurchgänge
μ_{ϕ_p, θ_p}	Erwartungswert Verfahrenwinkel-Offset
θ, θ_p	vertikaler Verfahrenwinkel Stellmotor, LED-Anordnung
ϑ	Kugelkoordinate
$\vartheta_{n,m}$	diskreter vertikaler Detektionswinkel Fahrerassistenzkamera
ρ_{DBSCAN}	Maß für Dichteerreichbarkeit
$\rho_v(\tau, \zeta)$	Reflexionsfaktor
σ	Standardabweichung
$\sigma_\alpha, \sigma'_\alpha, \sigma''_\alpha$	Standardabweichung horizontale Fehlstellung mehrere Messdurchgänge
$\sigma_\beta, \sigma'_\beta, \sigma''_\beta$	Standardabweichung vertikale Fehlstellung mehrere Messdurchgänge
σ^2	Varianz
$\sigma_0^2(t), \sigma_1^2(t)$	bedingte Varianz der Grauwertklasse
$\sigma_{E_p}^2$	Varianz Detektionsdistanz
$\sigma_{\text{in}}^2(t)$	Varianz in der Grauwertklasse
$\sigma_{n,m}^2$	Varianz Pixel-Offset
$\sigma_{\text{zwi}}^2(t)$	Varianz zwischen den Grauwertklassen
$\sigma_{\phi_p, \theta_p}^2$	Varianz Verfahrenwinkel-Offset
τ	Einstrahlwinkel
Ω	Wahrscheinlichkeitsraum
Ω_0	Raumwinkel Einheitselement
ψ	Winkel im Hough-Raum
ζ	Betrachtungswinkel

Literaturverzeichnis

- [1] ADAC: *Lichttest 2012: Jedes zweite Auto hat Mängel an der Beleuchtung*. 2012, <http://tinyurl.com/aell782>, geprüft am 25.09.2014
- [2] ADAC: *Reifendruck-Kontroll-Systeme (RDKS)*. 2014, <http://tinyurl.com/147gmez>, geprüft am 19.01.2015
- [3] ALBOU, P.; BOINET, L.; RAVIER, J.P.: Very thin headlamps with laser beam. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *10th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 15. Utz Verlag, 2013, S. 128–139
- [4] AMSEL, C.; FLORISSEN, G.; PIETZONKA, S.: Die nächste Generation lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 112 (10). 2010, S. 759–763
- [5] ANGER, T.; HAACKE, M.; KÜPPE, L.; LESCH, N.; LÜTTGENS, G.: Next Generation of automotive HID bulbs: Low power Xenon. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *8th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 13. Utz Verlag, 2009, S. 152–156
- [6] ARMBRUSTER, T.: Car-to-X-based Lighting Systems. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *10th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 15. Utz Verlag, 2013, S. 433–440
- [7] ARMBRUSTER, T.; LEHMANN, U.; AMENT, C.: Car2X-basierte Lichtsysteme. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. April 2014*. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2221), S. 123–133
- [8] AUSTERSCHULTE, A.; DREIER, B.; ROSENHAHN, E.-O.: Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam Functions. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *10th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 15. Utz Verlag, 2013, S. 321–330
- [9] AUSTERSCHULTE, A.; DREIER, B.; ROSENHAHN, E.-O.: Analyse von Sicherheitsaspekten adaptiver Matrix-Fernlicht Funktionen der nächsten Generation. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. April 2014*. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2221), S. 261–271
- [10] BACHER, J.; PÖGE, A.; WENZIG, K.: *Clusteranalyse: Anwendungsorientierte Einführung in die Klassifikationsverfahren*. 3. Auflage. München : Oldenbourg Verlag, 2010. – ISBN 978-3-486-58457-8

-
- [11] BAUDISCH, A.; RICHTER, K.; SOLLMANN, S.: Erweiterte Vorgehensmodelle für die Entwicklung echtzeitfähiger, hoch integrierter multifunktionaler Steuergeräte Plattformen. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *15. Internationaler Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug : Elektrik, Elektronik, Elektromobilität; Baden-Baden, 12. und 13. Oktober 2011*. VDI Verlag, 2011 (VDI-Berichte 2132), S. 371–380
- [12] BAUMANN, G.; RUMBOLZ, P.; PIEGSA, A.; GRIMM, M.; REUSS, H.-C.: Analyse des Fahrereinflusses auf den Energieverbrauch von konventionellen und Hybridfahrzeugen mittels Fahrversuch und interaktiver Simulation. In: VDI-WISSENSFORUM (Hrsg.): *SIMVEC - Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau : 15. Kongress mit Fachausstellung, Baden-Baden, 16. und 17. November 2010*. VDI Verlag, 2010 (VDI-Berichte 2107), S. 69–83
- [13] BECKER, K.: Vielfalt beherrschen - Variantenmanagement. In: *APION - Automobil-Produktion 24(2011)11*. 2011, S. 30–32
- [14] BEHRENDT, J.C.; BISCHOFBERGER, J.; DEUTZMANN, R.; EHMKE, H.; FRINGS, S.; GRISSMER, S.; HOTH, M.; KURTZ, A.; LEIPZIGER, J.; MÜLLER, F.; PEDAIN, C.; RETTIG, J.; WAGNER, C.; WISCHMEYER, E.: *Physiologie*. Stuttgart : Thieme Verlag, 2010. – ISBN 978–3–138411–9
- [15] BERLITZ, S.; FUNK, C.; HORST, R.; ROSENOW, A.: Assistenzsysteme zur Verbesserung der Sicht bei Tag und Nacht. In: *ATZextra (01)*. 2011, S. 192–197
- [16] BERLITZ, S.; HAMM, M.; FUNK, C.: Matrix-LED-Scheinwerfer von Audi. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 116 (03)*. 2014, S. 10–15
- [17] BERLITZ, S.; HUMMEL B.: Patentschrift: Verfahren zur automatischen Justage einer Lichteinheit eines Fahrzeugs und Leuchtsystem für ein Fahrzeug. (2009), Nr. DE 10 2007 049 619 A1 2009.04.23
- [18] BLÜMER, H.; PÜTZ, E. ; WIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT DES KRAFTFAHRZEUGGEWERBES (Hrsg.): *Zahlen & Fakten 2006: Ausgabe 2007*. 2007, <http://tinyurl.com/l6smxh8>, geprüft am 22.12.2014
- [19] BLÜMER, H.; PÜTZ, E. ; WIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT DES KRAFTFAHRZEUGGEWERBES (Hrsg.): *Zahlen & Fakten 2007: Ausgabe 2008*. 2008, <http://tinyurl.com/m8n3l4l>, geprüft am 22.12.2014
- [20] BLÜMER, H.; PÜTZ, E. ; WIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT DES KRAFTFAHRZEUGGEWERBES (Hrsg.): *Zahlen & Fakten 2008: Ausgabe 2009*. 2009, <http://tinyurl.com/n4qb4gz>, geprüft am 22.12.2014
- [21] BOEHM, G.; BEMMER, C.; MOSER, A.: Reduzierung der mechanischen Komplexität bei gleichzeitiger Erhöhung der Funktionalität von Scheinwerfersystemen - Das ZKW Matrix-lite. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 5. VDI-Tagung, Karlsruhe, 24. und 25. April 2012*. VDI Verlag, 2012 (VDI-Berichte 2154), S. 59–71
-

-
- [22] BÖHM, M.; KREMS, J.F.; LOCHER, J.: Efficacy of Adaptive Front-Lighting Systems - A Field Study Under Further Consideration of Drivers' Customary High Beam Usage Behaviour. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *8th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 13. Utz Verlag, 2009, S. 238–242
- [23] BREH, W.; SCHÄTZLER, K.: *Chancen der Energiewende: Wissenschaftliche Beiträge des KIT zur 1. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie, 19.06.2012*. Karlsruhe : KIT Scientific Publishing, 2013 (KIT Scientific Reports 7640)
- [24] BRONSTEIN, I.N.; SEMENDJAJEW, K.A.; MUSIOL, G.; MÜHLIG, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. 6. Auflage. Frankfurt am Main : Deutsch Verlag, 2006. – ISBN 3–8171–2006–0
- [25] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: §50 Scheinwerfer für Fern- und Abblendlicht. In: *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung*. 2012, <http://tinyurl.com/o82a2tr>, geprüft am 22.12.2014
- [26] BURGER, W.; BURGE, M.-J.: *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2005. – ISBN 3–540–21465–8
- [27] BURGER, W.; BURGE, M.J.: *Digitale Bildverarbeitung: Eine Einführung mit Java und ImageJ*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2006. – ISBN 3–540–30940–3
- [28] CANNY J.: A computational approach to edge detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Bd. 8. IEEE, 1986, S. 679–698
- [29] CEBRON, N.: *Aktives Lernen zur Klassifikation großer Dantemengen mittels Exploration und Spezialisierung*. Konstanz, Universität Konstanz, Diss., 2008
- [30] DECKER, D.; HAGE, M.; JERG, F.; TATARTSCHUK, E.: Produktionsentstehungsprozess für Scheinwerfer und Heckleuchten. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 115 (11)*. 2013, S. 888–893
- [31] DIEM, C.: *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2004
- [32] DOHLUS, R.: *Photonik: Physikalisch-technische Grundlagen der Lichtquellen, der Optik und des Lasers*. München : Oldenbourg Verlag, 2010. – ISBN 978–3–486–58880–4
- [33] DREIER, B.: Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zum Justieren einer Grundeinstellung eines Scheinwerfers eines Kraftfahrzeuges. (2012), Nr. EP 2 485 032 A2
- [34] DÜMBGEN, L.: *Biometrie*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010. – ISBN 978–3–8348–0662–8
-

- [35] ESTER, M.; KRIEGEL, H.-P.; SANDER, J.; XU, X.: A density based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: SIMOUDIS, E.; HAN, J.; FAYYAD, U. (Hrsg.): *2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 1996, S. 226–231
- [36] EWERHART, F.: *Entwicklung und vergleichende Bewertung einer videobasierten Kurvenlichtsteuerung für adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2002
- [37] FIEDERLING, R.; REINERS, T.; LIEBETRAU, T.; PARTH, D.: Intelligentes LED Modulsystem für adaptive Matrix Fernlichtlösungen. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. April 2014*. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2221), S. 247–259
- [38] FLANNAGAN, M. : Visual Performance of Headlighting Systems and Maintenance of Aim in Use. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *9th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 14. Utz Verlag, 2011, S. 1–12
- [39] FLANNAGAN, M.J.; SIVAK, M.; TRAUBE, E.C.: *Visual aiming of low-beam headlamps: Effects of experience and ambient light*. The University of Michigan Transportation Research Institute, 1997 (Report No. UMTRI-97-03)
- [40] FLEURY, B.; EVRARD, L.; RAVIER, J.P.; REISS, B.: Erweiterte Funktionalität blendfreier LED-Fernlichtsysteme. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 114 (6)*. 2012, S. 510–517
- [41] FORSYTH, D.A.; PONCE, J.: *Computer Vision A Modern Approach*. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall Verlag, 2003 (Prentice Hall series in artificial intelligence). – ISBN 0–13–085198–1
- [42] FRATTY, H.: *Adaptive Driving Beam: Application to Matrix Beam*. Report 23. 2014 (Driving Vision News)
- [43] FÜHRER, T.; HEGER, T.; HECKEL, J.: Stereo-Videokamera als Basis für Assistenzfunktionen. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 116 (02)*. 2014, S. 22–26
- [44] FUNK, C.: *Heterogene Sensordatenfusion für eine prädiktive Lichtsteuerung*. Hannover, Universität Hannover, Diss., 2014
- [45] HABERÄCKER, P.: *Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung*. München : Hanser Verlag, 1995. – ISBN 3–446–15517–1
- [46] HANNING, T.: *Rechnersehen: Grundlagen der pixelbasierten maschinellen Bildverarbeitung*. Passau : Schuster Verlag, 2010. – ISBN 978–3–940784–07–0
- [47] HEGEMANN, S.; LÜKE, S.; NILLES, C.: Randsteinerkennung als Teil der urbanen Fahrerassistenz. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 115 (11)*. 2013, S. 894–899
-

- [48] HELLA KGAA HUECK & CO.: *Lichttechnik: Technische Information*. 2008, <http://tinyurl.com/crq3sz8>, geprüft am 22.12.2014
- [49] HELLA KGAA HUECK & CO.: *Licht ist Technologie: Know-How für den Werkstatt-Profi*. 2011, <http://tinyurl.com/ctyh596>, geprüft am 22.12.2014
- [50] HENTSCHEL, H.-J.: *Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik*. 5. Auflage. Heidelberg : Hüftig Verlag, 2002. – ISBN 3–7785–2817–3
- [51] HERING, E.; MARTIN, R.: *Photonik: Grundlagen, Technologie und Anwendung*. 1. Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2006. – ISBN 978–3–540–23438–8
- [52] HILGENSTOCK, J.; SCHNEIDER, A.; KIRCHNER, A.: Patentschrift: Verfahren zur Bestimmung einer Eigenschaft für den Betrieb eines Kraftfahrzeugs und entsprechend ausgestaltetes Kraftfahrzeug. (2008), Nr. DE 10 2008 011 699 A1 2008.09.25
- [53] HOFFMANN, I.: Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zur Kalibrierung einer durch einen Frontscheinwerfer eines Fahrzeugs erzeugten vertikalen Hell-Dunkel-Grenze. (2009), Nr. DE 10 2008 025 459 A1 2009.12.03
- [54] HUHNS, W.: *Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Diss., 1999
- [55] HUMMEL, B.: *Blendfreies LED-Fernlicht*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Diss., 2010
- [56] IZHAR, L.I.; ASIRVADAM, V.S.; LEE, S. N.: Segmentation of Sinus Images for Grading of Severity of Sinusitis. In: BADIOZE ZAMAN, H.; ROBINSON, P.; PETROU, M.; OLIVIER, P.; SCHRÖDER, H.; SHIH, T.K. (Hrsg.): *Visual Informatics: Bridging Research and Practice* Bd. 1. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2009, S. 202–212
- [57] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. 7., neu bearb. Auflage. Berlin : Springer Vieweg Verlag, 2012. – ISBN 978–3–642–04951–4
- [58] JANOUCH, S.: Mobileye setzt auf MIPS Kerne - Fahrerassistenz. In: *EAIIVE - Elektronik automotive (2010)7/8*. 2010, S. 12
- [59] JEBAS, C.: *Physiologische Bewertung aktiver und passiver Lichtsysteme im Automobil*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Techonlogie, Diss., 2012
- [60] KAUSCHKE, R.: *Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfer*. Paderborn, Universität Paderborn, Diss., 2006
- [61] KIEL, H.: *Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern mit Lichtsimulation*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2011
-

- [62] KLEIN, B.: *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finiten-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 8., verbesserte und erweiterte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010. – ISBN 978–3–8348–0844–8
- [63] KLEINKES, M.: *Objektivierte Bewertung des Gütemerkmals Homogenität für Scheinwerfer-Lichtverteilungen*. Bielefeld, Universität Bielefeld, Diss., 2003
- [64] KÖSTER, U.; PÜTZ, E. ; WIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT DES KRAFTFAHRZEUGGEWERBES (Hrsg.): *Zahlen & Fakten 2009: Ausgabe 2010*. 2010, <http://tinyurl.com/ofd7vsg>, geprüft am 22.12.2014
- [65] KÖSTER, U.; PÜTZ, E. ; WIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT DES KRAFTFAHRZEUGGEWERBES MBH (Hrsg.): *Zahlen & Fakten 2010: Ausgabe 2011*. 2011, <http://tinyurl.com/pv6bdqm>, geprüft am 22.12.2014
- [66] KÖSTER, U.; PÜTZ, E. ; WIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT DES KRAFTFAHRZEUGGEWERBES MBH (Hrsg.): *Zahlen & Fakten 2012: Ausgabe 2013*. 2013, <http://tinyurl.com/o2ulhbt>, geprüft am 22.12.2014
- [67] KRAFTFAHRZEUG GEWERBE: *Bilanz des Licht-Tests: Keine Besserung in Sicht*. 2013, <http://tinyurl.com/q9a5nhc>, geprüft am 22.12.2014
- [68] KRAFTFAHRZEUG GEWERBE: *Licht-Test-Wochen 2014 sind eröffnet*. 2014, <http://tinyurl.com/lewnzh9>, geprüft am 22.12.2014
- [69] KRÜCKEBERG, J.: *Hochleistungs LEDs in der Praxis*. Poing : Franzis Verlag, 2007. – ISBN 978–3–7723–5498–4
- [70] KRÜGER, L.; MOISEL, J.; RITTER, W.; SEEKIRCHNER, J.; THOM, M.; ULKEN, M.; WOLTERMANN, B.: Patentschrift: Verfahren zum Justieren und/oder Kalibrieren zumindest eines Scheinwerfers eines Fahrzeugs. (2012), Nr. DE 10 2011 109 440 A1 2012.04.19
- [71] KUBITZA, B.; WILKS, C.; SCHÄFER, S.: Automatische Justage eines hochauflösenden Scheinwerfers. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. April 2014*. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2221), S. 207–218
- [72] KUHLE, P.: *Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf*. Paderborn, Universität Paderborn, Diss., 2006
- [73] LACHMAYER, R.; GÖTZ, M.; KLEINKES, M.; POHLMANN, W.: LED-Technik im Scheinwerfer: Neue Möglichkeiten mit Leuchtdioden. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 108 (11)*. 2006, S. 957–961
- [74] LACHMAYER, R.; JÜRGENS, C.: Eigenblendung an retroreflektierenden Verkehrsschildern. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. April 2014*. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2221), S. 87–94
-

- [75] LACHMAYER, R.; WOLF, A.; KLOPPENBURG, G.: Lichtmodule auf Basis von laseraktiviertem Leuchtstoff für den Einsatz als Zusatzfernlicht: Untersuchung von Leuchtstoffen und Aufbau eines Lichtmoduls. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. April 2014*. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2221), S. 31–43
- [76] LEE, T.; KWAK, N.; PARK, D.; KIM, S.; MOON, I.; HAM, W.; LEE, S.: Predictive AFS Control using Navigation Information. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *10th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 15. Utz Verlag, 2013, S. 62–69
- [77] LEHNERT, P.: *Auswirkung der Fahrzeugdynamik auf die Lichtverteilung von Scheinwerfern*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2001
- [78] LIEBSKE, R.: *Long Range Radar*. 2012, <http://tinyurl.com/oqk78yx>, geprüft am 23.02.2015
- [79] LIU, F.: *Objektverfolgung durch Fusion von Radar- und Monokameradaten auf Merkmalsebene für zukünftige Fahrerassistenzsysteme*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2009
- [80] LOCHER, J.; KLEY, F.: Disability and Discomfort Glare of Headlamps. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *8th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 13. Utz Verlag, 2009, S. 38–42
- [81] LOCHER, J.; SCHMIDT, S.; ISENBORT, A.; KLEY, F.; STAHL, F.: Blendung durch Gegenverkehr: Scheinwerfereigenschaften, Sehleistung und Blendgefühl. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit (1)*. 2008, S. 10–15
- [82] MAHA MASCHINENBAU HALDENWANG GMBH & Co. KG: *Beste (Aus)Sicht: Adaptive Lichtsysteme sichern Leben*. 2011, <http://tinyurl.com/qcgcu6w>, geprüft am 22.12.2014 (Pressemitteilung)
- [83] MAHA MASCHINENBAU HALDENWANG GMBH & Co. KG: *Kamerabasierte Scheinwerfereinstellung*. 2012, <http://tinyurl.com/najhu7s>, geprüft am 22.12.2014 (Pressemitteilung)
- [84] MANZ K.: Are Measurements for the Cut-Off Gradient of Head Lamps in Different Measurement Distances Possible? In: *SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, March 6-9, 2000*. 2000 (SAE Technical Paper Series 2000-01-0803)
- [85] MAURER, M.; STILLER, C.: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin : Springer Verlag, 2005. – ISBN 3–540–23296–6
- [86] MERZIGER, G.; WIRTH, T.: *Repetitorium der höheren Mathematik*. 5. Auflage. Springer : Binomi Verlag, 2006. – ISBN 3–923923–33–3
-

- [87] MICHENFELDER, S.; NEUMANN, C.: Propix (Projektor-Pixellicht) - Aktueller Entwicklungsstand und praktische Erprobung mittels Probandenstudien. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. April 2014*. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2221), S. 233–245
- [88] MOISEL, J.; ACKERMANN, R.; GRIESINGER, M.: Adaptive Headlights utilizing LED-Arrays. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *8th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 13. Utz Verlag, 2009, S. 287–296
- [89] NAEUMANN, J.: *TÜV Report 2014: Deutsche Fahrzeuge auf den Spitzenplätzen/Hauptuntersuchung sorgt für Verkehrssicherheit*. 2013, <http://tinyurl.com/kftaz64>, geprüft am 22.12.2014 (Verband der TÜV e.V., Presse und Öffentlichkeitsarbeit)
- [90] OMERBEGOVIC, S.; FUNK, C.; NEUMANN, C.: Funktionsentwicklung eines Matrix LED-Scheinwerfers und Konzeptionierung von prädiktiven Lichtfunktionen. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 6. VDI-Tagung, Karlsruhe, 06. und 07. April 2014*. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2221), S. 219–229
- [91] OTSU N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. In: *IEEE Transactions of Systems Man and Cybernetics* Bd. 9. IEEE, 1979, S. 62–66
- [92] PEDROTTI, F.; PEDROTTI, L.; BAUSCH, W.; SCHMIDT, H.: *Optik für Ingenieure: Grundlagen*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2008. – ISBN 978-3-540-73471-0
- [93] PETRI, S.: *Entwicklung einer bildverarbeitungs-basierten Scheinwerferkalibrierung unter Berücksichtigung statischer und dynamischer Einflussfaktoren*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Diplomarbeit, 2009
- [94] PLANK J.: Static ADB Systems: Comparison of different solutions regarding masking performance and complexity. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *10th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 15. Utz Verlag, 2013, S. 48–61
- [95] POLLACK, W.: Lage und Qualität der Hell-Dunkel-Grenze in der Lichtverteilung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 100 (01). 1998, S. 58–64
- [96] REIF, K. : *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure*. 4., überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978-3-8348-8658-3
- [97] REIF, K.: *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme*. 6. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (Bosch Fachinformation Automobil). – ISBN 978-3-8348-1274-2
-

-
- [98] RIEDEL, B.: *Effizienzsteigerung in organischen Leuchtdioden*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2011
- [99] ROSENHAHN, E.-O.: *Entwicklung von lichttechnischen Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer für Schlechtwetterbedingungen*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Diss., 1999
- [100] ROSLAK, J.: *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*. Paderborn, Universität Paderborn, Diss., 2005
- [101] ROSLAK, J.; WILKS, C.; VENKER, U.; HESSE, H.: Statistics-based approaches for designing of LED array headlight systems. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *10th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 15. Utz Verlag, 2013, S. 339–350
- [102] RUNKLER, T.A.: *Data Mining: Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2010. – ISBN 978-3-8348-0858-5
- [103] SCHÄFER, S.; PAI, A.; RUFFER, M.: Aktorbasierte, selbstjustierende Scheinwerferkonzepte als Beitrag zur Steigerung der Verkehrssicherheit - der selbstjustierende Scheinwerfer. In: *Licht 2014*. 2014 (Tagungsband der 21. Gemeinschaftstagung lichttechnischer Gesellschaften)
- [104] SCHMIDT, C.; HOFFMANN, I.: Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zur Überprüfung eines lichttechnischen Fahrerassistenzsystems. (2012), Nr. DE 10 2010 049 047 2012.04.19
- [105] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.: Bewertung der Hell-Dunkel-Grenze bezüglich ihrer Qualität, Lage und Linearität. In: SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J. (Hrsg.): *Progress in Automobile Lighting*. Utz Verlag, 1995, S. 171–177
- [106] SCHÖTTLE, M.: Baupläne für effiziente LED-Lichttechnik. In: *ATZelektronik 5 (06)*. 2010, S. 9–11
- [107] SCHRAMMEL, E.: Die objektive Gefährdung beim Nachtunfall. In: BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *Symposium: Phänomen Nachtunfall - Informationsaufnahme und Handlungskonsequenzen im nächtlichen Straßenverkehr*. 1992 (Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen), S. 4–8
- [108] SCHRÖDER, G.; TREIBER, H.: *Technische Optik: Grundlagen und Anwendungen*. 10. Auflage. Würzburg : Vogel Verlag, 2007. – ISBN 978-3-8343-3086-4
- [109] SCHULTZ, M.: *Entwicklung eines individuenbasierten Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Passagieren im Flughafenterminal*. Technische Universität Dresden, Dresden, Diss., 2010
-

- [110] SIVAK, M.; FLANNAGAN, M.; CHANDRA, D.; GELLATLY, A.W.: *Visual aiming of european and u.s.low-beam headlamps*. The University of Michigan Transportation Research Institute, 1991 (Report No. UMTRI-91-34)
- [111] SIVAK, M.; FLANNAGAN, M.J.; MIYOKAWA, T.: *Quantitative comparison of factors influencing the performance of low-beam headlamps*. The University of Michigan Transportation Research Institute, 1998 (Report No. UMTRI-98-42)
- [112] SPRUTE, J.H.: *Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2012
- [113] SPRUTE, J.H.; HAFFERKEMPER, N.; KHANH, T.Q.: Fernlichtnutzung: Fehlbedienung und Risikokompensation durch Autofahrer - Potenziale für Fernlichtassistenzsysteme. In: *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (2)*. 2010, S. 44–50
- [114] SULLIVAN, J.M.; ADACHI, G.; MEFFORD, M.L.; FLANNAGAN, M.J.: *High-beam headlamp usage on unlighted rural roadways*. The University of Michigan Transportation Research Institute, 2003 (Report No. UMTRI-2003-2)
- [115] TANER, A.; TOTZAUER, A.; HUMMEL B.: Patentschrift: Verfahren zur Kalibrierung eines wenigstens einen Scheinwerfer eines Kraftfahrzeuges ansteuernden Fahrzeugsystems. (2012), Nr. EP 2 416 139 B1
- [116] THOM, M.; HAHN, S.; RITTER, W.; GLOGER J.: Patentschrift: Verfahren zum Justieren und/oder Kalibrieren zumindest eines Scheinwerfers eines Fahrzeugs. (2011), Nr. DE 10 2010 048 689 A1 2011.05.12
- [117] THOM, M.; ULKEN, M.; KRÜGER, L.; RITTER, W.: Headlight Range Calibration During Driving Operation. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *9th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 14. Utz Verlag, 2011, S. 535–549
- [118] THOMAS DAHLEM: *Methoden zur Bewertung von Kraftfahrzeugscheinwerfern*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2001
- [119] TÖNNIES, K.D.: *Grundlagen der Bildverarbeitung*. München : Pearson Studium Verlag, 2005. – ISBN 3–8273–7155–4
- [120] TOTZAUER, A.: Automatische Scheinwerfer Online-Kalibrierung im Fahrbetrieb. In: VDI WISSENSFORUM (Hrsg.): *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik : 5. VDI-Tagung, Karlsruhe, 24. und 25. April 2012*. VDI Verlag, 2012 (VDI-Berichte 2154), S. 47–58
- [121] TOTZAUER, A.: *Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2013
- [122] TOTZAUER, A.: Patentschrift: Verfahren und Scheinwerferanlage zum Ausgleich von Ausrichtungsfehlern eines Scheinwerfers. (2013), Nr. DE 10 2012 007 908 A1 2013.10.24
-

- [123] UNARSKI, J.; WACH, W.; ZEBALA, J.: Zur Erkennbarkeit von Objekten unter begrenzten Sichtverhältnissen - ein Forschungsbericht: Teil 1. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 38(2000)7/8*. 2000, S. 184–193
- [124] VON HOFFMANN, A.: *Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2003
- [125] WALLENTOWITZ, H.; REIF, K.: *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen - Komponenten - Systeme - Anwendungen*. 2. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978-3-8348-0700-7
- [126] WEBER, S.; HANAFI, A.; ERDL, H.: A new efficient, compact vehicular illumination system using high-power semiconductor laser diodes. In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *10th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 15. Utz Verlag, 2013, S. 159–170
- [127] WEIBLER, K.P.: Kameragesteuerte Optimierung des Scheinwerferlichts. In: *ATZelektronik 5 (05)*. 2009, S. 42–49
- [128] WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2009 (ATZ/MTZ-Fachbuch). – ISBN 978-3-8348-0287-3
- [129] WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA: *Regelung Nr. 112 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE): Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer für asymmetrisches Abblendlicht und/oder Fernlicht, die mit Glühlampen und/oder LED-Modulen ausgerüstet sind*. 2010, <http://tinyurl.com/pt4f2n4>, geprüft am 14.10.2014
- [130] WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA: *Regelung Nr. 123 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE): Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen (AFS) für Kraftfahrzeuge*. 2010, <http://tinyurl.com/q5bkcaz>, geprüft am 14.10.2014
- [131] WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA: *Regelung Nr. 48 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE): Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich des Anbaus der Beleuchtungs- und Lichtsignaleinrichtungen*. 2011, <http://tinyurl.com/o8y9bzv>, geprüft am 14.10.2014
- [132] WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA: *Regelung Nr. 98 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE): Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeugscheinwerfer mit Gasentladungslichtquellen*. 2014, <http://tinyurl.com/q23kqst>, geprüft am 14.10.2014
-

-
- [133] WOLTERMANN, B.: Patentschrift: Verfahren zum Kalibrieren und Justieren einer Lichteinheit eines Fahrzeugs. (2011), Nr. DE 10 2010 046 517 A1 2011.04.28
- [134] WÖRDENWEBER, B.; WALLASCHEK, J.; BOYCE, P.; HOFFMAN, D.: *Automotive Lighting and Human Vision*. Berlin : Springer Verlag, 2007. – ISBN 978-3-540-36696-6
- [135] ZEIDLER, E.: *Springer-Handbuch der Mathematik II*. Wiesbaden : Springer Verlag, 2013. – ISBN 978-3-658-00296-1
-

Betreute Arbeiten

- [136] BERGHOFF-ISING, D.: *Übertragung von Bildverarbeitungsinformationen zur Optimierung der Hell-Dunkel-Grenzen-Auswertung*. Bochum, Bochum University of Applied Sciences, Masterthesis, 2014
- [137] HANSWILLEMENKE, F.: *Untersuchungen zur Einstellung des Hauptscheinwerfers mittels eines Referenzlaufalgorithmus*. Berlin, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Bachelorthesis, 2013
- [138] KIRCH, M.: *Bildauswertung einer Abblendlichtverteilung zur Realisierung einer automatischen Scheinwerfergrundeinstellung*. Aachen, RWTH Aachen, Masterthesis, 2013
- [139] LA MARCA, A.: *Entwicklung eines adaptiven Bildverarbeitungsalgorithmus zur Verbesserung intelligenter Lichtsysteme*. Stuttgart, Hochschule der Medien, Masterthesis, 2013
- [140] LAUMANS, A.: *Untersuchungen zur geometrischen Orientierung der Hell-Dunkel-Grenze*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Masterthesis, 2014
- [141] SARALAJEW, S.: *Berechnung der Fehlstellungen eines Scheinwerfersystems*. Mittweida, Hochschule Mittweida, Masterthesis, 2014
- [142] WIND, H.: *Entwicklung eines Softwaremodells zur Umsetzung eines Matrix-Beam Algorithmus*. Aalen, Hochschule Aalen, Bachelorthesis, 2014

Publikationsliste

- [143] SARALAJEW, S.; VILLMANN, T.; SÖHNER, S.: An Application of the Generalized Matrix Learning Vector Quantization Method for Cut-off-line Classification of Automobile-Headlights. In: *Machine Learning Reports 01/2015*. 2015
- [144] SÖHNER, S.: Eigenlichterkennung mittels Fahrerassistentenkamera zur Umsetzung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung. In: *Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik - 115. Jahrestag, Karlsruhe, 10.Juni - 14.Juni 2014*. 2014 (DGaO - Proceedings), S. 118
- [145] SÖHNER, S.: Patentschrift: Verfahren und Anordnung zur Darstellung einer Lichtstärkenverteilung einer zu prüfenden Lichtquelle. (2014), Nr. DE 102012112690 A1
- [146] SÖHNER, S.; DJORDJEVIC, D.: Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zur Diebstahlprävention bei Fahrzeugteilen. (2014), Nr. DE 102013104872 A1
- [147] SÖHNER, S.; JÜRGENS, C.; MICHAEL, U.: Patentschrift: Vorrichtung zur Simulation einer Passierfahrt eines entgegenkommenden Kraftfahrzeugs. (2014), Nr. DE 102012112590 A1
- [148] SÖHNER, S.; KIRCH, M.: Patentschrift: Verfahren zur adaptiven Hell-Dunkel-Grenzen Erkennung. (2014), Nr. DE 102012110377 A1
- [149] SÖHNER, S.; SCHAAL, T.: Patentschrift: Leuchtsystem für ein Kraftfahrzeug sowie Verfahren zur Justage einer Lichteinheit eines derartigen Leuchtsystems. (2014), Nr. DE 102012110534 A1
- [150] SÖHNER, S.; SCHAAL, T.: Patentschrift: Leuchtsystem für ein Kraftfahrzeug sowie Verfahren zur Justage einer Lichteinheit eines derartigen Leuchtsystems. (2014), Nr. DE 102013101607 A1
- [151] SÖHNER, S.; SCHAAL, T.: Patentschrift: Leuchtsystem für ein Kraftfahrzeug sowie Verfahren zur Justage einer Lichteinheit eines derartigen Leuchtsystems. (2014), Nr. DE 102012110535 A1
- [152] SÖHNER, S.; SCHAAL, T.: Patentschrift: Leuchtsystem für ein Kraftfahrzeug sowie Verfahren zur Justage einer Lichteinheit eines derartigen Leuchtsystems. (2014), Nr. DE 102013105506 A1

-
- [153] SÖHNER, S.; SCHAAL, T.; HEIMPEL, P.; BORTOLAZZI, J.; STORK, W.: Automatic headlamp setting (AHS). In: KHANH, T.Q. (Hrsg.): *10th International Symposium on Automotive Lighting* Bd. 15. Utz Verlag, 2013, S. 70–79
- [154] SÖHNER, S.; STORK, W.: Online-Kalibrierung von Hauptscheinwerfern und Referenzmessverfahren. In: VDI-WISSENSFORUM (Hrsg.): *SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung : 17. Kongress mit Fachausstellung, Baden-Baden, 18. und 19. November 2014*. VDI Verlag, 2014 (VDI-Berichte 2224), S. 639–702
-

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Sebastian Söhner
Anschrift: Wildeckstraße 15
70469 Stuttgart
Geburtsdatum/-ort: 01.07.1986, Mosbach
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulausbildung

1993 - 1997 Grundschole, Allfeld
1997 - 2006 Nicolaus-Kister-Gymnasium, Mosbach
Juni 2006 Abitur

Studium

WS 06/07 - WS 11/12 Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik
April 2012 Abschluss Dipl.-Ing.

Arbeitsverhältnis

seit Mai 2012 Dr.-Ing. h. c. F. Porsche AG
Entwicklungszentrum Weissach
Elektrik Elektronik Karosserie Lichtelektronik
Doktorand

Weissach, den 06.03.2015