1 Einleitung

1.1 Motivation

Moderne Scheinwerferderivate charakterisieren sich als Pixellichtsysteme [18, 20, 97, 29, 162, 94, 179, 146], um der ursprünglichen Prämisse einer optimalen Szenenbeleuchtung bei Vermeidung von Verkehrsblendungen [271, 244] bestmöglich zu entsprechen. Die aktuellen Seriensysteme sind vornehmlich durch additive LED Beleuchtung geprägt, obgleich ein Trend zu höheraufgelösten additiven sowie subtraktiven Systemen [134, 84, 93] zu erkennen ist. Die entsprechenden Forschungsthemen fokussieren hierbei die Entwicklung und Integration neuartiger Lichtquellen [69, 96, 7, 294, 231, 12, 68, 265], die Lichtstromsegmentierung und -lenkung [22, 99, 59, 254, 193] sowie die Simulation und Bewertung resultierender Lichtverteilungen [71, 140, 123, 247, 218].

Diese hardwareseitigen Bestrebungen bilden das Fundament, um das funktionale Spektrum automobiler Scheinwerfersysteme zu erweitern und diesen für teil- und vollautonome Fahrfunktionen zu etablieren. Hierzu ist bereits in heutigen Forschungen eine Tendenz abzuleiten, den Scheinwerfer neben der ursprünglichen Interpretation als Projektionssystem ebenso als Kommunikations- [186, 187, 143, 278, 94, 139] und Wahrnehmungskomponente [164, 264, 62] im Fahrzeug zu integrieren.

Der Funktionsumfang zur scheinwerferbasierten Kommunikation hat in den vergangenen Jahren einen deutlichen Zuwachs erfahren und lässt eine Differenzierung in Eigen- und Fremdkommunikation zu. Was diese Funktionen einen, ist die Projektion charakteristischer Muster [187, 94, 278] unter der Berücksichtigung einer Kamera-Scheinwerfer-Kopplung. Jene Fusion bildet die Grundlage bestehender Lichtassistenz und kann als Standard vorausgesetzt werden [30, 117, 19, 20]. Was der heutigen Serienapplikation jener Funktion jedoch entgegenspricht, ist die momentan fehlende gesetzliche Legitimation für derartige Musterprojektionen [283, 284].

Diese ausbleibende Legitimation führt zu einer Diskrepanz zwischen hardwareseitiger Entwicklung und den funktionalen Abnehmern. Um dem entgegenzuwirken, kann der Fokus auf die scheinwerfergestützten Wahrnehmungsfunktionen gerichtet werden. Die aktuellen Bestrebungen, den Scheinwerfer als Sensorkomponente zu integrieren sind jedoch als rein integrativ zu verstehen [164, 264, 62]. Hierbei werden existente Sensorkomponenten in den Scheinwerfer integriert, um eine effizientere Bauraumauslastung und bedingt eine Optimierung der Sensorspezifikation zu erzielen. Durch jenen Ansatz

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

bestehen die systembedingten Nachteile der integrierten Sensorik jedoch weiterhin. Beispielhaft sei hierbei die Funktionsdegradation der Tiefenmessung aufbauend auf Mono- und Stereokamerasystemen für niedrige Beleuchtungszustände [196, 43, 251] sowie die geringe Messtiefe heutiger Ultraschallsensoren zu nennen [281, 210]. Ferner kann durch den integrativen Ansatz die existente Diskrepanz von Hardware- und Funktionsentwicklung nicht aufgelöst werden.

Es erscheint demgemäß zielführend, eine Wahrnehmungsfunktion zu etablieren, welche neben der gesetzlichen Konformität ebenso die aktuellen und zukünftigen Hardwareentwicklungen berücksichtigt. Dementsprechend kann diese scheinwerfergestützte Wahrnehmung als redundante Sensorkomponente in das automobile Sensorset integriert werden. Hierdurch wäre die partielle Plausibilisierung von zukünftigen Scheinwerfersystemen im Fokus von teil- und vollautonomen Fahrfunktionen möglich.

1.2 Zielsetzung

Die dargelegten Entwicklungsbestrebungen und resultierenden Zielkonflikte motivieren die Untersuchungen zur Nutzung heutiger Pixellichtscheinwerfer als wahrnehmende Sensorsysteme.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines tiefenwahrnehmenden Scheinwerfers unter der Berücksichtigung einer Scheinwerfer-Kamera-Kopplung. Demgemäß soll die Tiefenmessung über die Projektion von Basislichtverteilungen durch die Pixellichtsysteme und der entsprechenden Akquisition durch die Fahrerassistenzkamera ermöglicht werden. Hierzu ist die Verwendung von Serienderivaten aus aktuellen Baureihen vorzusehen. Weiterhin ist die Sensorik auf die Berücksichtigung gesetzeskonformer Lichtverteilungen auszurichten. Um den Anforderungen einer seriennahen Sensorlösung weiterhin zu entsprechen, sollen zudem exklusiv die existenten Signale der Lichtassistenz und die entsprechenden Seriendatensätze berücksichtigt werden. Die Tiefenmessung unterliegt der Parametrisierung geometrischer Modelle, wodurch die Entwicklung geeigneter Kalibrieralgorithmen notwendig wird. Weiterhin sind Online-Kalibrierverfahren zu berücksichtigen, um eine etwaige Scheinwerferfehlstellung im Fahrbetrieb zu kompensieren. Die Kalibrierungen und Tiefenmessungen bauen auf charakteristischen Merkmalen der Lichtprojektion auf, welche durch geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen aus dem Rohbild der Fahrerassistenzkamera bereitzustellen sind. Die Ausführungen jener Algorithmen sind durch eine bildbasierte Aktivierungsroutine zyklisch zu prüfen. Die Bewertung der Tiefensensorik ist durch die Verwendung einer Referenzmessmethode anzustreben, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickeln ist. Die Bewertung ist hierbei simulativ und experimentell durchzuführen und sollte die Analyse der Invarianz hinsichtlich geometrischen Veränderungen der Szene und auftretenden Rauscheinflüssen fokussieren. Hierauf aufbauend, ist die Einordnung der scheinwerferbasierten Sensorik in den Kontext existenter Sensorsysteme durch einen Vergleich mit etwaigen Nahbereichssensoren vorzusehen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1.3 Aufbau

Die vorliegende Arbeit baut auf dem Stand der Technik, der theoretischen Einleitung und Systemadaption des Funktionsprinzips, der modellbasierten Tiefenrekonstruktion und den einhergehenden Bildverarbeitungsmethoden sowie den experimentellen Untersuchungen und den hieraus abgeleiteten weiterführenden Handlungsempfehlungen auf.

Der Stand der Technik wird in Kapitel 2 beschrieben. Hierbei werden die Lichtverteilung eingeführt und die Systemkomponenten Scheinwerfer und Kamera diskutiert. Ferner werden Funktionen der Lichtassistenz erläutert, wobei eine Differenzierung zur Szenenbeleuchtung und Umfeldkommunikation angestrebt wird.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 die Motivation für eine scheinwerferbasierte Wahrnehmung hergeleitet und eine Übersicht bildbasierter Rekonstruktionsmethoden gegeben. Ein qualitativer Vergleich dieser Methodiken stellt die theoretische Eignung des zu Grunde liegenden Funktionsprinzips für die scheinwerfergestützte Tiefenwahrnehmung dar. Durch die Erläuterung bekannter praktischer Anwendungsfälle dieser Methodik wird der interdisziplinäre methodische Bezug hergeleitet und eine Kategorisierung der definierten bildbasierten Rekonstruktionsmethode gegeben.

Die Adaption des eingeführten Funktionsprinzips auf die genannte Scheinwerfer-Kamera-Kopplung wird in Kapitel 4 erläutert. Hierzu werden zunächst die mathematischen Grundlagen dargelegt und eine Fehlerbetrachtung angestrebt. Unter deren Berücksichtigung werden nachfolgend die Systemanforderungen unter Beachtung aktueller Nahbereichssensoren für eine seriennahe Entwicklung abgeleitet und der einhergehende Systemablauf mit den Funktionsmodulen angeführt.

Darauffolgend werden die Algorithmen zur Umsetzung der Gesamtsensorik erläutert. Hierzu wird zunächst in Kapitel 5 das geometrische Scheinwerfer- und Kameramodell dargelegt und nachfolgend die Methoden der Initial- und Online-Kalibrierung herausgearbeitet. In der Folge sind die geometrischen Modelle parametrisiert und bilden die Grundlage für die Triangulationsalgorithmik zur Tiefenmessung, welche abschließend erläutert wird. Die Kalibrier- und Triangulationsroutine setzen charakteristische Merkmale auf Basis der projizierten Lichtverteilung als Eingangsgrößen voraus. Kapitel 6 erläutert hierzu die Bildverarbeitungsalgorithmen. Hierbei wird eine Differenzierung in regel- und datengetriebener Verarbeitung angeführt, was der Berücksichtigung von charakteristischen Musterprojektionen oder gesetzeskonformen Basislichtverteilungen zu Grunde liegt. Abschließend wird die bildbasierte Aufschaltroutine vorgestellt, welche eine Aktivierung und zyklische Überwachung der angeführten Funktionsmodule ermöglicht.

Die Bewertung der Kalibrier-, Triangulations- und Bildverarbeitungsalgorithmik aus Kapitel 5 und 6 wird in Kapitel 7 angeführt. Hierbei wird wiederkehrend zunächst

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

die experimentelle Fragestellung herausgestellt und darauf aufbauend die Vorgehensweise unter Berücksichtigung des Referenzmesssystems und der Bewertungsmetriken erläutert. Die folgenden Untersuchungen legen die simulativen und experimentellen Ergebnisse aufbauend auf den eingangs definierten Fragestellungen dar. Hierbei liegt der Fokus für die gesamten Funktionsmodule auf der Betrachtung und Bewertung der Invarianz hinsichtlich der Distanz und dem Rotationswinkel der Projektionsoberfläche sowie dessen Leuchtdichte und Farbgebung.

Die Erkenntnisse aus Kapitel 7 werden herangezogen, um in Kapitel 8 weiterführende Handlungsempfehlungen für eine Serienapplikation der Sensorik abzuleiten. Diese bilden gemeinsam mit der Zusammenfassung, Kapitel 9 und 10, den Abschluss der vorliegenden Arbeit.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2 Stand der Technik

Im Folgenden werden die Grundlagen hinsichtlich moderner Scheinwerfersysteme und Fahrerassistenzkameras dargelegt und hierauf aufbauend die Lichtassistenz erläutert.

2.1 Kraftfahrzeugscheinwerfer

Die Grundlagen moderner Scheinwerfersysteme werden einführend mit den standardisierten und gesetzeskonformen Lichtverteilungen erläutert. Darauf aufbauend werden die zur Generierung der beschriebenen Lichtverteilungen notwendigen Systeme eingeführt. Hierbei wird einerseits auf die Reflektions- und Projektionssysteme sowie andererseits auf die Leuchtmittel und die zusammenfassenden Pixellichtsysteme eingegangen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Entwicklung ab den LED-Systemen angeführt wird, da die scheinwerferbasierte Tiefenwahrnehmung als Motivation der zugrundeliegenden Arbeit Multipixel-Scheinwerfersysteme fordert.

2.1.1 Lichtverteilungen

In der Fahrzeugtechnik sind drei Grundlichtverteilungen etabliert - Abblendlicht, Fernlicht sowie Nebellicht [213]. Hierbei haben die Lichtverteilungen variierende funktionale Anforderungen und unterscheiden sich entsprechend in ihren Reichweiten und Ausleuchtungsbereichen [213, 244, 140]. Um diese zu standardisieren, bestehen spezifische Gesetzmäßigkeiten. Die global maßgeblichen Vorschriften stellen die ECE-[1][282] und SAE-[2][283] Regelungen dar. Die Definition der zuvor angeführten Lichtverteilungen wird in der ECE-Regelung ECE112 umgesetzt. Basierend auf der Bestimmung photomerischer Werte für verschiedene Messpunkte auf einem Projektionsschirm in 25 m Distanz zum Scheinwerfer werden die Verteilungen definiert und im Serieneinsatz als konform bestätigt [282, 213, 244]. Auszüge der Messpunkte des Projektionsschirms sowie eine beispielhafte Abblend- und Fernlichtverteilung sind Abbildung 2.1 zu entnehmen. Die definierten Lichtverteilungen sind spezifisch an charakteristische Szenarien angepasst. Eine Abblendlichtverteilung hat das Ziel, eine adäquate seitliche sowie vorwärtsgerichtete Frontbeleuchtung zu ermöglichen, ohne jedoch hierbei die Verkehrsteilnehmer im Verkehrsraum zu blenden. Entsprechend ist das Abblendlicht durch eine sogenannte Hell-Dunkel-Grenze (HDG) charakterisiert. Diese Grenze verläuft im Bereich des Gegenverkehrs unter einem Neigungswinkel von 1 % und beschreibt den Übergang von beleuchtetem zu unbeleuchtetem Bereich.

[1] Economic Commission for Europe.
[2] Society of American Engineers.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

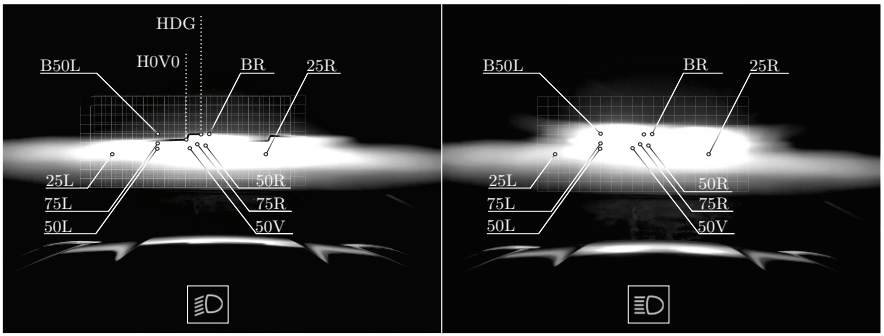


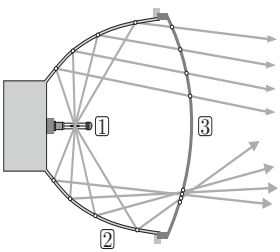
Abbildung 2.1: Darstellung des Messschirms mit definierten Testpunkten zur Standardisierung der Grundlichtverteilungen entsprechend ECE112 [282]

Die Abblendlichtverteilung ist charakteristisch durch den sogenannten H0V0 Punkt, welcher den Übergang der horizontal verfaufenden HDG mit dem nachfolgenden Anstieg definiert [282, 238]. Diese Formgebung dient der Prämisse des Abblendlichtes, eine gute Ausleuchtung der eigenen Fahrbahn zu ermöglichen, gleichzeitig allerdings eine Blendung des Gegenverkehrs zu vermeiden. Im Kontrast hierzu dient das Fernlicht als mittelbetonte Lichtverteilung der maximalen Ausleuchtung des Verkehrsraums ohne einer entsprechenden Berücksichtigung der möglichen Blendung. Um eine starke Beleuchtung im Zentralbereich der Lichtverteilung zu ermöglichen, wird das Fernlicht mit einer vertikalen Streubreite von $\pm$ 10° projiziert [282, 213]. In Relation zur Abblendlichtverteilung ist eine Zunahme der Beleuchtungsstärke um das 16-Fache im Punkt 75R für ein korrespondierendes Fernlicht möglich [282]. Das Nebellicht ist wiederum konträr hierzu vornehmlich für die Beleuchtung des direkten Fahrzeugvorfeldes angedacht und weist dementsprechend eine geringere vorwärts gerichtete, jedoch eine ausgeprägte lateral ausgedehnte Lichtverteilung auf. Auf Basis der rapiden Entwicklungssprünge von Scheinwerfersystemen werden adaptive Scheinwerfersysteme diskutiert, welche die Grundlichtverteilung an Umgebungsvariabilitäten anpassen. Hierdurch ist eine Modifikation der zuvor beschriebenen ECE112 notwendig, woraus ECE123 [283] resultiert. In dieser Gesetzesvorschrift werden neue Lichtfunktionen definiert, um die Fahrzeugfrontbeleuchtung optimal an Straßen- und Verkehrssituationen anzupassen. An dieser Stelle sei hierfür auf den einhergehenden Gesetzestext [283] sowie die Arbeiten von Sprute [244] und Roslak [213] verwiesen.

2.1.2 Optische Systeme

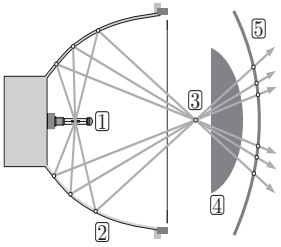
Optische Systeme in der Scheinwerfertechnik werden genutzt, um die Lichtverteilung der Leuchtmittel zu formen und den Verkehrsraum nach den gesetzlichen Regularien auszuleuchten. Die einhergehenden Konzepte sind Abbildung 2.2 zu entnehmen und werden im Folgenden eingeführt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



1 – Leuchtmittel
2 – Freiflächenreflektor
3 – Abdeckscheibe

(a) Reflektionssystem



1 – Leuchtmittel
2 – Freiflächenreflektor
3 – Fokusbereich
4 – Linsensystem
5 – Abdeckscheibe

(b) Projektionssystem

Abbildung 2.2: Darstellung von (a) Reflektions- und (b) Projektionssystemen. Angepasst von [105]

Reflektionssysteme

Bei konventionellen Scheinwerfersystemen werden zumeist Paraboloidreflektoren verwendet. Hierbei wird eine Rotationsparabel hinter dem Leuchtmittel positioniert, um die Kollimation des Lichtes zu ermöglichen. Zusätzliche Prismen- und Zylinderlinsen in der Abschlussscheibe sind jedoch notwendig, um die Lichtverteilung zu formen und somit die standardisierte Lichtverteilung (siehe Abschnitt 2.1.1) mit den charakteristischen Merkmalen, wie beispielsweise Hell-Dunkel-Grenzen, zu realisieren [105, 30, 140]. Eine Weiterentwicklung der einfachen Paraboloidreflektoren stellen sogenannte Freiflächenreflektoren dar. Diese Systeme basieren auf Reflektoren, welche frei im Raum auf Basis von CAD-Berechnungen (Computer-Aided Design) geformt sind. Durch diese Technik kann das Lichtbild bereits auf der Reflektorfläche gebildet werden. Eine nachgeschaltete Korrektur des Lichtbildes durch optische Elemente in der Abschlussscheibe entfällt entsprechend. Freiflächenreflektoren finden heute vor allem durch die positiven Designaspekte für Halogen- und Xenon-Scheinwerfer breite Anwendung [105, 52].

Projektionssysteme

Analog zu Reflektionssystemen finden in den projektiven Systemen Ellipsoide oder Freiflächenreflektoren Verwendung, um die generierte Lichtverteilung zu kollimieren. Darüber hinaus wird jedoch eine nachgeschaltete asphärische Linse genutzt, um das parallele Strahlenbündel zu formen und auf der Straße eine entsprechende Lichtverteilung abzubilden [30, 238]. Neben Reflektor und Linsenoptik kommt des Weiteren eine Blende zur Anwendung, welche zwischen den Komponenten positioniert ist und im

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Vergleich zu Reflektionssystemen eine kontraststärkere Hell-Dunkel-Grenze abbildet [140]. Dieses optische System ermöglicht eine höhere Streubreite und eine Konzentration der Hell-Dunkel-Grenze, wodurch eine verbesserte Ausleuchtung mit erweiterter Reichweite resultiert [105]. Entsprechend sind Projektionssysteme im heutigen Mittel- und Oberklassensegment fest etabliert und stellen den Standard dar [30].

2.1.3 Leuchtmittel

Zur Generierung des Lichtstroms werden in modernen Fahrzeugderivaten neben Halogen- und Xenon-Lampen vermehrt LEDs (Light-Emitting-Diodes) und Laserdioden appliziert. Die zu Grunde liegenden Funktionsweisen und Systemvorteile werden im Folgenden dargelegt.

LED

LEDs stellen eine besondere Form von Gleichrichterdioden dar, welche unter dem Einwirken der Elektronenluminiszenz Photonen emittieren. Für die entsprechenden elektrotechnischen Grundlagen sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur [243, 108, 10, 261, 60] verwiesen. Aufgrund der Bandlückenbreite[3] emittieren LEDs näherungsweise monochromatisches Licht [160, 108]. Entsprechend ECE112 sind für Scheinwerfersysteme jedoch ausschließlich die Emission von weißem Licht zulässig [282], wobei in der Literatur eine Farbtemperatur von 5200 Kelvin als Optimum deklariert wird [180]. Diese Vorgabe orientiert sich an den Farbtemperaturen des Sonnenlichtes, welches einen Bereich von 5000 bis 5800 Kelvin aufweist [132] und an der Lichtausbeute, welche für kühle Farbtemperaturen generell höher ausfällt [158]. In heutigen Scheinwerfersystemen kommen zumeist Galiumnitrid LEDs mit $\lambda_{em} = 450 - 470$ nm zum Einsatz [214]. Um den Wellenlängenbereich auf das Spektrum des weißen Lichtes zu heben, wird der blaue Emitter mit einem Lumineszenzfarbstoff wie beispielsweise anorganischem Phosphor kombiniert. Aufgrund der Photolumineszenz wird durch das energiereiche und kurzwellige blaue Licht der Farbstoff aktiviert und die Emission von langwelligen und energieärmeren gelbem Licht im Farbstoff bewirkt. Da ein Teil des blauen Lichtes ohne Energieabgabe den Farbstoff durchläuft, umfasst die Konvertierung nicht das gesamte blaue Licht. Dementsprechend sorgt die additive Mischung der Spektralfarben für die Emission des weißen Lichtes [103, 53, 138]. In der Folge ermöglichen LED-Scheinwerfersysteme die Projektion von Licht, welche den Lichtemissionen des Tageslichtes ähneln und so eine angenehme und homogene Lichtverteilung bieten. Als die wesentlichen Vorteile von LED-Systemen gegenüber Halogen- oder Xenon-Scheinwerfer sind die erhöhte Lichteffizienz, die homogene Lichtverteilung sowie die hohe Lebensdauer und hiermit einhergehenden verringerten Wartungskosten zu nennen. Darüber hinaus ergeben sich durch die Verringerung des Bauraums Potentiale hinsichtlich neuartiger Integrationskonzepte [30, 229, 180, 17, 263, 112].

[3] Energetischer Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband im quantenmechanischen Bändermodell.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Laser

Neben der LED ist in den vergangenen Jahren vermehrt die Verwendung von Laserdioden für Fernlichtanwendung und Pixellichtsysteme zu beobachten [93, 279, 99]. Dies ist vorallem durch die zahlreichen Vorteile von Laserdioden, wie beispielsweise der geringen Strahlendivergenz, der hohen Fokussierbarkeit des Laserstrahls sowie der erhöhten Leuchtdichte zu begründen [93, 60, 85, 99]. Laserdioden setzen das Funktionsprinzip der stimulierten Emission um. Hierbei ergibt sich die Funktionsweise eines Lasers aus dem Ablauf der Photonenabsorption und der stimulierten Emission in einem metastabilen Zustand. Für eine weiterführende Erläuterung sei an dieser Stelle auf [176, 261, 60, 85] verwiesen. Entsprechend Gut [93] sind in der momentanen Entwicklung vornehmlich blaue Laser in der Anwendung, was durch die thermischen Anforderungen im Fahrzeug zu begründen ist. Darüber hinaus gibt Gut [93] in seiner Dissertation zwei Ansätze zur Umsetzung eines laserbasierten Pixellichtsystems. Zum einen die laserbasierte Weißlichtquelle, welche dem Funktionsprinzip der LED-Systeme ähnelt. Hierbei wird durch Fluoreszenzkonversion das blaue Licht des Lasers in langwelligere Strahlung konvertiert. Vorteilhaft ist hierbei die erzielte hohe Leuchtdichte von 2000 $\frac{cd}{m^2}$ - 3000 $\frac{cd}{m^2}$ bei Gewährleistung der Augensicherheit. Demgegenüber sei jedoch die erhöhte Strahlendivergenz und Effizienzverlust im Konverter zu nennen. Alternativ zur Weißlichtquelle verweist Gut [93] auf den Ansatz der RGB-Farbmischung. Jener Ansatz sieht keine Konverterverluste vor und weist geringe Strahlendivergenzen auf, woraus eine verbesserte Strahlentiefe resultiert. Demgegenüber sorgt dies jedoch auch für einen deutlichen Anstieg der Augensicherheitsanforderungen [93]. In Kombination mit dem Mangel an entsprechenden Laserquellen, welche den automobilen Anforderungen entsprechen würden, ist jener Ansatz noch Gegenstand aktueller Forschungen. Dementsprechend finden in heutigen Serienanwendungen vornehmlich laserbasierte Weißlichtquellen Anwendung [93, 279].

2.1.4 Pixellichtsysteme

Die in Abschnitt 2.1.1 bis 2.1.3 erläuterten Verteilungen und Systeme finden in modernen Scheinwerferderivaten vermehrt als Pixellichtsysteme Anwendung. Entsprechend Kauschkes Ausführungen [134] kann hierbei zwischen der additiven, subtraktiven und variablen optischen Erzeugung der Lichtverteilung differenziert werden, wo jedoch letzeres nach Götz und Eichhorn [84] ebenso der additiven Erzeugung zugeordnet werden kann. In der vorliegenden Arbeit wird die Definition nach Götz [84] verwendet und im Folgenden vier wesentliche hochauflösende Scheinwerfertechnologien erläutert.

LED-Array

LED-Matrixscheinwerfersysteme werden den additiven Systemen zugeordnet und generieren die Lichtverteilung durch räumlich separierte LEDs mit individuellen Linsensystemen [93]. Jede LED ist separat dimmbar und einem diskreten geometrischen Abstrahlbereich zugeordnet. Durch die gezielte Dimmung einzelner LEDs kann so-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

mit die Lichtverteilung adaptiv verändert und auf die Fahrzeugfrontszene ausgericht werden. Infolgedessen kann anhand von Matrix-Scheinwerfersystemen AFS[4] Funktionalitäten entsprechend Abschnitt 2.3 anhand der jeweiligen Dimmung von Subsystemen ermöglicht werden. Eine mechanische Bewegung wie beispielsweise bei Voll-LED- oder Xenon-Systemen entfällt daher [30, 263]. Matrix-Scheinwerfer werden erstmalig kommerziell im Audi A8 2013 eingesetzt [263, 97]. Dieser baut auf einem Abblendlicht- und Fernlichtsegment auf. Letzeres ermöglicht die AFS Funktionalität auf Basis von 25 einzeln dimmbaren LEDs. Diese sind in Gruppen zu fünft zusammengefasst und projizieren die adaptive Lichtverteilung über fünf Reflektoren auf die Fahrzeugvorszene [117, 93]. Heutige Matrix-Scheinwerfersysteme basieren auf LED-Technik, welche sich im Wesentlichen in ihren Designkonzepten und ihrer Pixelauflösung differenzieren. Im E- und F[5]-Segment sind hierbei bereits Auflösungen von bis zu 84 Pixel im Serieneinsatz. Als beispielhaft sei hierbei der Daimler Multi-Beam-Scheinwerfer in der E-Klasse [188], sowie das Porsche Matrix-Beam-System im aktuellen Panamera und Cayenne zu nennen. Letzeres wird als wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit in Abschnitt 2.1.5 näher erläutert. Um diese Systeme kontinuierlich weiterzuentwickeln, wird vornehmlich in den Bereichen der optischen Systeme, LED-Effizienz und Steigerung der Pixeldichte geforscht. Im Bereich der LED-Effizienz ist ein Trend mit dem Fokus auf Hochstrom-LEDs erkennbar. Werden ab 2008 1,5 A LEDs zur Generierung von Abblendlicht, Fernlicht und ADB Lichtverteilungen (Adaptive Driving Beam) eingesetzt, sind heute vermehrt 3 A Dioden im Gespräch. Diese haben im Wesentlichen den Vorteil der erhöhten Leuchtdichte und der Lokalisation des Beleuchtungsmaximums nahe der Hell-Dunkel-Grenze [68, 221]. Entsprechend Schildmann und Rosenhahn [221] kann durch den Einsatz von Hochstrom-LEDs die mittlere Leuchtdichte im Brennpunkt mehr als verdoppelt werden, wodurch Werte von 160 $\frac{cd}{mm^2}$ erreicht werden. Dem entgegen steht jedoch der erhöhte Wärmehaushalt und die gesteigerte Leistungsaufnahme. Folglich liegt die mittlere Lichtausbeute von Hochstrom LEDs noch signifikant unter den aktuell in Verwendung befindlichen Dioden, was auf den prototypischen Entwicklungsstatus zurückzuführen ist [68]. Neben den angeführten Aktivitäten wird zudem die Entwicklung von höher aufgelösten Systemen vorangetrieben. Dies ist vornehmlich der präziseren Scheinwerferausleuchtung geschuldet, welche durch höher aufgelöste Systeme resultiert. Stanley hat hierfür beispielhaft ein LED Scheinwerfersystem entwickelt, was 288 individuell steuerbare LEDs umfasst [254]. Die LED-Matrix ist hierbei auf sechs Reihen und 48 Spalten aufgeteilt und ermöglicht so eine horizontale Auflösung von 0,5° bei einem entsprechenden horizontalen Beleuchtungsbereich von 24°. Darüber hinaus werden im Rahmen des von OSRAM koordinierten Forschungsprojektes µAFS (Micro-structured Adaptive Front-lighting System) Multi-Pixel-LED-Chips entwickelt, welche die lichtemittierenden Pixel mit der Ansteuerungselektronik auf einem Silizium-Chip kombiniert [265, 88]. Das aus dem Forschungsverbund resultierende Industrieprojekt Eviyo integriert vier dieser Chips in ein adaptives Scheinwerfersystem und weist eine Pixeldichte von 4096 einzeln

[4] Adaptives Frontlicht System.
[5] E: Obere Mittelklasse, F: Luxusklasse [30].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.